



TUGAS AKHIR - TF 141581

**PEMODELAN PERPINDAHAN PANAS PADA
SIRIP DALAM (*INTERNAL FIN*) PADA
PEMBANGKIT UAP *SUPERHEAT***

WITJAKSONO ADI S
NRP. 2414 106 001

Dosen Pembimbing
Ir. Sarwono, MM.
Nuryanti, ST., MSc.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TF 141581

***SIMULATION OF HEAT TRANSFER
INTERNAL FIN AT SUPERHEAT
GENERATOR***

WITJAKSONO ADI S
NRP. 2414 106 001

Supervisor
Ir. Sarwono, MM.
Nuryanti, ST., MSc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

**LEMBAR PENGESAHAN
PEMODELAN PERPINDAHAN PANAS PADA SIRIP
DALAM (*INTERNAL FIN*) PADA PEMBANGKIT UAP
*SUPERHEAT***

TUGAS AKHIR

**Oleh :
WITJAKSONO ADI S
NRP. 2414 106 001**

Surabaya, Januari 2017
Mengetahui / Menyetujui,

Pembimbing I



Ir. Sarwono, MM.
NIP. 19580530 198303 1 002

Pembimbing II



Nuryanti, ST., MSc.
NIP. 19760426 200912 2 002



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D
NIP. 19780902 200312 1 002

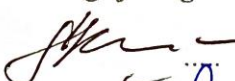
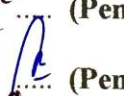

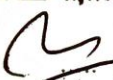

LEMBAR PENGESAHAN
PEMODELAN PERPINDAHAN PANAS PADA SIRIP
DALAM (*INTERNAL FIN*) PADA PEMBANGKIT UAP
SUPERHEAT

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
WITJAKSONO ADI S
NRP 2414 106 001

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Sarwono, MM.  (Pembimbing I)
2. Nuryanti, ST., MSc.  (Pembimbing II)
3. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., PhD  (Penguji I)
4. Ir. Harsono Hadi, M.T., PhD.  (Penguji II)
5. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T  (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI 2017

PEMODELAN PERPINDAHAN PANAS PADA SIRIP DALAM (*INTERNAL FIN*) PADA PEMBANGKIT UAP *SUPERHEAT*

Nama Mahasiswa : Witjaksono Adi S
NRP : 2414 106 001
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Sarwono., M.M.
2. Nuryanti S.T., MSc.

Abstrak

Salah satu fasa air setelah uap jenuh adalah fasa uap *superheat* dimana temperaturnya kurang lebih 100°C. Secara eksperimen telah dikembangkan suatu pembangkit uap *superheat* yang mudah dibawa (*portable*) dimana dengan menggunakan ketel yang sudah ada di pasaran kemudian dilakukan modifikasi penambahan sirip di sepanjang dinding ketel. Temperatur uap yang dihasilkan dapat mencapai 200-an derajat celcius. Namun untuk pengembangan lebih lanjut metode eksperimen langsung akan menghabiskan dana yang cukup besar, oleh karena itu akan dilakukan pemodelan dengan menggunakan *software*. Dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan. Pada umumnya terdapat tiga tahapan untuk melakukan proses simulasi, yaitu: *preprocessing*, *processing* dan *postprocessing*. Berdasarkan pengukuran, uap *superheat* yang dibangkitkan yaitu sekitar 250⁰C. Temperatur uap *superheat* yang dihasilkan alat dengan temperatur yang dihasilkan simulasi tidak jauh berbeda. Temperatur yang dihasilkan simulasi sebesar 227°C. Penggunaan sirip menunjukkan bahwa ketercapaian temperatur uap *superheat* dipengaruhi oleh laju aliran kalor.

Kata kunci : Uap *superheat*, pembangkit uap, *fin*, *software* simulasi.

SIMULATION OF HEAT TRANSFER INTERNAL FIN AT SUPERHEAT GENERATOR

Name : Witjaksono Adi S
NRP : 2414 106 001
Departement : *Engineering Physics* FTI-ITS
Supervisors : 1. Ir. Sarwono M.M.
2. Nuryanti, S.T., MSc.

Abstract

One of the water phase after the saturated vapor is the vapor phase in which the superheat temperature of approximately 100°C. In experiments have developed a superheat steam generators, portable which by using a kettle that is already on the market than modification of adding fins along the walls of the boiler. The resulting steam temperature can reach 200 degrees Celsius. However, for the further development of the direct experimental method would spend substantial funds, therefore, will do the modeling by using software. By utilizing the help of computational computer to perform calculations. In general, there are three stages to perform process simulation, namely: preprocessing, processing and postprocessing. Based on the measurements, the superheat steam is generated which is about 250 °C. Superheat steam temperature generated by the temperature generated tool simulation is not much different. The resulting simulation temperature of 227°C. The use of fin indicates that the achievement of superheat steam temperature is influenced by the rate of heat flow.

Key words : Superheat steam, steam generator, fin, software simulations.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, penulis mampu menyelesaikan laporan penelitian Tugas Akhir yang berjudul “Pemodelan Perpindahan Panas Pada Sirip Dalam (*Internal Fin*) Pada Pembangkit Uap *Superheat*”.

Pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang selalu memberi motivasi dan do’a.
2. Bapak Ir. Sarwono, M.M. dan Ibu Nuryanti, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang senantiasa sabar memberikan bimbingan, motivasi dan arahan dalam menyelesaikan penelitian ini.
3. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah mendukung kegiatan simulasi.
4. Saudara Syahrizal Taufik, A.Md. dan saudara Teuku Reza Maulana F, A.Md. selaku instruktur yang senantiasa sabar memberikan arahan dalam pengerjaan simulasi maupun perhitungan dalam penelitian ini.
5. Teman-teman Lintas Jalur Teknik Fisika 2014 yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
6. Teman-teman Lintas Jalur Teknik Mesin 2015 yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Jika dalam penulisan laporan penelitian ini terdapat kesalahan maka saran dan kritik yang membangun dari semua pihak sangat diharapkan. Penulis berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 25 Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ... Error! Bookmark not defined.	
LEMBAR PENGESAHAN ... Error! Bookmark not defined.	
Abstrak	v
Abstract	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Perpindahan Panas	5
2.2 Pembangkit Uap <i>Superheated</i>	9
2.3 <i>Fin</i> (Sirip)	11
2.4 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Diagram Alir Penelitian	19
3.2 Alat Yang Dijadikan Bahan Penelitian	22
3.3 Proses Simulasi	24
BAB IV DATA DAN ANALISA PEMBAHASAN	35
4.1 Data Pengukuran	35
4.2 Data Hasil Simulasi	38
4.3 Analisa	41
4.4 Validasi Proses	43
4.5 Pembahasan	44
BAB V PENUTUP	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	47

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN A
LAMPIRAN B
LAMPIRAN C
LAMPIRAN D
LAMPIRAN E
LAMPIRAN F
BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Mekanisme perpindahan panas	5
Gambar 2.2	Perpindahan panas secara konduksi	6
Gambar 2.3	Perpindahan panas secara konveksi alami	7
Gambar 2.4	Skema pembangkit uap <i>superheat</i> dan sistem pemanasan.....	10
Gambar 2.5	Pemakaian sirip untuk menambah laju perpindahan panas.....	12
Gambar 3.1	Skema diagram alir penelitian tugas akhir	19
Gambar 3.2	Alat pembangkit uap <i>superheat</i>	22
Gambar 3.3	Prototipe pembangkit uap <i>superheat</i>	23
Gambar 3.4	<i>Fin</i> (Sirip).....	24
Gambar 3.5	Ketel uap	25
Gambar 3.6	Ketel pemanas air (<i>Boiler</i>)	25
Gambar 3.7	Geometri <i>real plant</i>	26
Gambar 3.8	<i>Meshing</i> pada bagian dinding ketel uap	27
Gambar 3.9	<i>Meshing</i> pada bagian dalam ketel uap.....	27
Gambar 3.10	Kolom <i>run</i>	33
Gambar 4.1	Titik yang diukur.....	35
Gambar 4.2	Grafik hasil uji coba	37
Gambar 4.3	<i>Cut plot</i> 2D.....	38
Gambar 4.4	<i>Cut plot</i> 3D.....	39
Gambar 4.5	<i>Surface plot</i>	40
Gambar 4.6	Suhu pada <i>fin</i>	40
Gambar 4.7	Grafik Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Hasil Perhitungan	44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Tabel Ukuran Alat	24
Tabel 3.2	<i>Boundary Condition Inlet Velocity</i>	30
Tabel 3.3	<i>Real Wall 2</i>	30
Tabel 3.4	<i>Reall Wall 1</i>	31
Tabel 3.5	<i>Static Pressure</i>	31
Tabel 3.6	<i>Material Setting Fluid Subdomains</i>	32
Tabel 4.1	Data Pengukuran	36
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran	43
Tabel 4.3	Hasil Simulasi	44

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu fasa air setelah uap jenuh adalah fasa uap *superheat* dimana temperaturnya kurang lebih 100°C dapat digunakan untuk memanaskan dan juga untuk mengeringkan sesuatu bahan. Pengeringan pada skala industri manufaktur dapat dilakukan pada suatu benda yang membutuhkan pengeringan secara konveksi seperti pada bed yang membutuhkan aliran fluida (*fluidized bed*), beberapa tipe konveyor, maupun penyemprot (*sprayer*). Pemanasan makanan dengan menggunakan uap *superheat* memiliki keuntungan antara lain terjaganya kandungan gizi dan kualitas yang menjadi syarat makanan sehat dibandingkan dengan pemanasan dengan menggunakan udara panas biasa. Selain itu pengoperasian dengan uap *superheat* tergolong aman, tidak menimbulkan ledakan dan tanpa oksidasi. Dikarenakan sifat uap yang sangat kering sehingga kandungan uap air sudah sangat minim.

Salah satu kelemahan dalam menghasilkan uap *superheat* adalah penggunaan energi yang lebih banyak daripada untuk menghasilkan udara panas biasa, dikarenakan energi tidak hanya untuk menghasilkan kalor tampak (*sensible heat*) namun juga kalor laten (kalor yang dibutuhkan untuk mengubah fasa namun tidak mengubah temperature). Salah satu upaya dalam mewujudkan pengefisienan energi yaitu dengan melakukan perancangan dan pembuatan sistem pembangkit uap *superheat* dengan menggunakan metode sirip dalam (*internal fin*). Dimana dengan pembuatan sirip di dalam ketel yang memperluas permukaan sehingga permukaan yang dipanaskan akan lebih banyak dan uap jenuh yang semula memiliki temperatur 100°C ketika bersentuhan dengan permukaan panas yang lebih luas diharapkan akan meningkat temperaturnya dan memasuki fasa *superheat*.

Mengingat energi yang digunakan cukup besar untuk menghasilkan uap *superheat* selain masih digunakan energi untuk *blower* maupun energi untuk mengkondensasikan sisa uap *superheat* maka dalam penelitian ini bertujuan untuk membuat sebuah system pembangkit uap *superheat* yang sedapat mungkin meminimalkan penggunaan energi dimana dari desain rancangan benda pembentuk uap *superheat* tidak memerlukan tambahan eksternal heater, uap *superheat* yang dibiarkan mengalir alami ke benda yang akan dipanaskan dan suatu *system control* pengumpanan air *continue* yang menggantikan *system* kondensasi.

Secara eksperimen telah dikembangkan suatu pembangkit uap *superheat* yang mudah dibawa (*portable*) dimana dengan menggunakan ketel yang sudah ada di pasaran kemudian dilakukan modifikasi penambahan sirip di sepanjang dinding ketel. Temperatur uap yang dihasilkan dapat mencapai 200-an derajat celcius meski tanpa penambahan tekanan. Namun untuk pengembangan lebih lanjut metode eksperimen langsung akan menghabiskan dana yang cukup besar, oleh karena itu akan dilakukan pemodelan perambatan panas pada sirip dengan menggunakan *software*. Dengan demikian akan diketahui karakteristik perpindahan panas baik dari dinding ketel ke sirip maupun dari sirip ke uap jenuh. Selain itu pengaturan layout sirip-sirip di dalam ketel dapat diubah-ubah baik tipe maupun sudutnya untuk mendapatkan suatu perpindahan panas yang optimal. Dengan demikian ke depannya diharapkan dapat dimplementasikan pada produk yang dapat meningkatkan nilai tambah.

Dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya. Prinsipnya adalah suatu ruang yang berisi fluida yang akan dilakukan penghitungan dibagi-bagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel dan prosesnya dinamakan *meshing*. Bagian-bagian yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol penghitungan yang akan dilakukan oleh aplikasi atau *software*. Kontrol-kontrol penghitungan ini beserta kontrol-kontrol

penghitungan lainnya merupakan pembagian ruang yang disebutkan tadi atau meshing. Nantinya, pada setiap titik kontrol penghitungan akan dilakukan penghitungan oleh aplikasi dengan batasan domain dan *boundary condition* yang telah ditentukan.

Sejarah CFD berawal pada tahun 60-an dan mulai terkenal pada tahun 70-an, awalnya pemakaian konsep CFD hanya digunakan untuk aliran fluida dan reaksi kimia, namun seiring dengan berkembangnya industri di tahun 90-an membuat CFD makin dibutuhkan pada berbagai aplikasi lain. Contohnya sekarang ini banyak sekali paket-paket software CAD menyertakan konsep CFD yang dipakai untuk menganalisa *stress* yang terjadi pada design yang dibuat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka permasalahan yang di angkat dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Bagaimana membuat suatu model perambatan panas dari dinding ketel ke sirip dan dari sirip ke uap jenuh ?
- Memilih *software* yang sesuai yang dapat menunjukkan perambatan panas secara visual.
- Perancangan *layout* dari bentuk maupun ukuran sirip yang sudah ada sehingga mendapatkan perpindahan panas yang optimal.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- *Superheat* dihasilkan dari pemanasan uap air tanpa melakukan perubahan tekanan.
- Pemodelan perpindahan panas antara uap air dan permukaan sirip berdasarkan pada konveksi alami.
- Pemodelan perpindahan panas menggunakan *software Computational fluid dynamic* (CFD).

- Dimensi sirip maupun jenis material yang digunakan disesuaikan dengan ukuran maupun material yang telah dibuat sebelumnya.
- Acuan dimensi maupun material yang digunakan disesuaikan dengan produk yang sudah ada di pasaran.

1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui karakteristik perpindahan panas dari sirip.
- Mendapatkan temperatur uap *superheat* yang tertinggi dari simulasi rancangan layout sirip yang dikeluarkan oleh sumber panas.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah suatu bentuk energi yang berpindah dari suatu badan atau sistem ke badan yang lain atau sistem sekitarnya. Jadi panas dapat pindah melewati batas suatu sistem, menuju atau dari sistem. Perpindahan panas ini terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara sistem dan sekitarnya.

Adapun kegunaan dari ilmu perpindahan panas yaitu:

- Untuk merencanakan alat-alat penukar panas (*heat exchanger*).
- Untuk menghitung kebutuhan media pemanas atau pendingin pada suatu reboiler kondensor atau dalam kolom destilasi.
- Untuk perhitungan furnace atau dapur pemanas.
- Untuk perancangan ketel uap atau boiler.
- Untuk perancangan alat-alat penguap (*evaporator*).
- Untuk perancangan reaktor kimia.

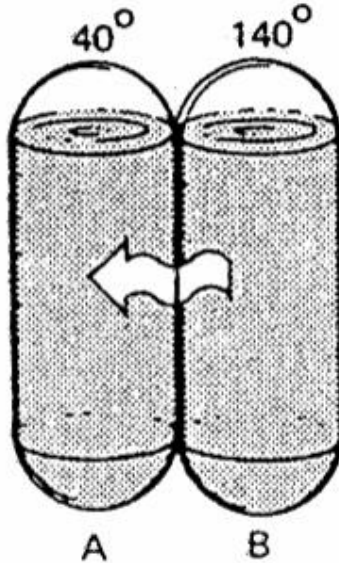
Perpindahan panas mengenal tiga cara pemindahan yang berbeda yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.



Gambar 2.1 Mekanisme perpindahan panas

2.1.1 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah dengan media penghantar panas tetap.



Gambar 2.2 Perpindahan panas secara konduksi

Laju perpindahan panas dengan cara konduksi dapat dihitung dengan hubungan:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

q = laju perpindahan panas (w),

k = konduktivitas termal bahan (w/m°C),

A = luas permukaan dimana panas mengalir (m²)

dT/dx = gradien suhu pada penampang, atau laju perubahan suhu T terhadap jarak dalam arah aliran panas x (°C/m).

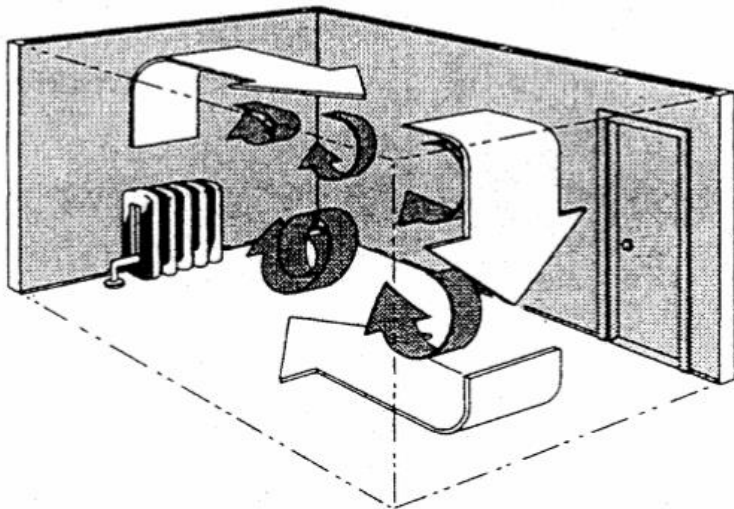
2.1.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir disekitarnya, dengan menggunakan media penghantar berupa fluida (cairan/gas).

Perpindahan panas secara konveksi juga terdapat macam-macam cara perpindahan panas nya, yaitu:

1. Konveksi Bebas (*free convection*)

Perpindahan panas yang disebabkan oleh beda suhu dan beda rapat saja dan tidak ada tenaga dari luar yang mendorongnya.



Gambar 2.3 Perpindahan panas secara konveksi alami

2. Konveksi Paksa (*forced convection*)

Perpindahan panas aliran gas atau cairan yang disebabkan adanya tenaga dari luar. Contohnya pada plat panas yang dihembus dengan kipas angin/*blower*.

Laju perpindahan panas dengan cara konveksi dapat dihitung dengan hubungan:

$$q = hA(\Delta T), \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

H = koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)

A = luas permukaan dimana panas mengalir (m^2)

ΔT = perubahan atau perbedaan suhu antara suhu permukaan

T_s dan suhu fluida T_∞ di lokasi yang ditentukan ($^\circ\text{C}$; $^\circ\text{F}$; $^\circ\text{K}$).

2.1.3 Radiasi

Radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran/sinaran/radiasi gelombang elektro-magnetik, tanpa memerlukan media perantara.

Radiasi selalu merambat dengan kecepatan cahaya, $3 \times 10^{10}\text{cm/s}$. Kecepatan ini sama dengan hasil perkalian panjang gelombang dengan frekuensi radiasi :

$$c = \lambda \nu \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

c = kecepatan cahaya

λ = panjang gelombang ($= 10^{-8}\text{cm}$)

ν = frekuensi

Perambatan radiasi thermal berlangsung dalam bentuk kuantum dan setiap kuantum mengandung energi sebesar:

$$E = h\nu \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

h = konstanta *Planck*, $6,625 \times 10^{-34}\text{ J.s}$

ν = frekuensi

Dengan teori relativitas dan thermodinamika statistik maka akan diperoleh suatu rumus yang disebut Hukum Stefan-Boltzmann dimana energi total yang dipancarkan oleh suatu benda sebanding dengan pangkat empat suhu absolut.

Laju perpindahan panas dengan cara radiasi dapat dihitung dengan hubungan:

$$q_r = \varepsilon \sigma A T^4 \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

ε = emisivitas bahan

A = luas penampang (m^2)

T = suhu (kelvin)

σ = konstanta *stefan boltzmann* ($5,67 \times 10^{-8}$)

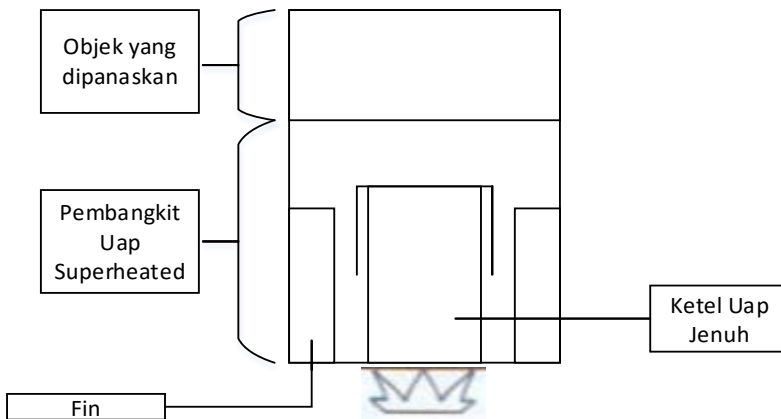
2.2 Pembangkit Uap *Superheated*

Uap superheat yang memiliki temperature di atas 100°C dapat dijadikan sebagai sumber kalor alternatif dalam melakukan pemanasan, pengeringan, bahkan dalam jumlah yang banyak dapat digunakan untuk memutar turbin. Hal tersebut dimungkinkan karena memiliki keunggulan antara lain sifatnya yang kering karena sudah tidak mengandung uap air dan emisifitas yang lebih tinggi dibandingkan uap jenuh biasa. Pada industri makanan peranan uap *superheat* cukup besar terutama pada pengembangan proses peningkatan kualitas dan keamanan yang menjadi persyaratan makanan sehat. Hal ini disebabkan pada pemanasan menggunakan uap superheat tidak melibatkan faktor oksigen di dalamnya.

Namun kelemahannya adalah energi yang digunakan untuk menghasilkan uap *superheat* lebih besar daripada untuk menghasilkan udara panas biasa, dikarenakan energi tidak hanya untuk menghasilkan kalor tampak (*sensible heat*) namun juga kalor laten (kalor yang dibutuhkan untuk mengubah fasa namun tidak mengubah temperature). Dengan demikian upaya untuk melakukan efisiensi dalam proses pembentukan maupun

pemanfaatan uap *superheat* masih terus menjadi suatu kajian yang menarik.

Adapun secara konvensional uap *superheat* dihasilkan oleh suatu sistem dimana dengan memanaskan air pada suatu *boiler* hingga mencapai titik didih (100°C) dan terbentuklah uap jenuh. Uap jenuh tersebut kemudian ditarik dengan menggunakan blower ke suatu ruang (*chamber*). Di sepanjang pipa penyaluran menuju ruang tempat benda yang akan dipanaskan/dikeringkan, uap jenuh diberikan pemanasan tambahan (*external heater*) sehingga temperaturnya akan bertambah di atas 100°C , dengan demikian Uap jenuh telah berganti fasa menjadi uap *superheat*. Untuk siklus tertutup biasanya uap *superheat* sisa akan kembali dikondensasikan untuk kemudian diumpankan kembali ke boiler untuk dididihkan kembali dan seterusnya.



Gambar 2.4 Skema pembangkit uap *superheat* dan sistem pemanasan

Dengan mengontrol debit air menggunakan control PLC sehingga debit air yang terapat pada ketel pemanas air terjaga volumenya.

Untuk dapat mengetahui seberapa besar aliran perpindahan kalor dari burner sampai air dapat menghasilkan temperatur 100°C, maka digunakan rumus sebagai berikut:

$$q = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{akhir} - T_{awal})}{t} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

m = masa air

C_p = koefisien air

T_{awal} = Temperatur air pada saat sbelum terjadi pembakaran

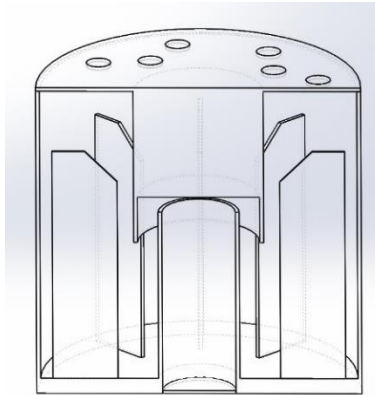
T_{akhir} = Temperatur 100°C

2.3 *Fin* (Sirip)

Sirip (*fin*) sebagai salah satu bagian penting dari pmbangkit uap superheat ini dirancang sedemikian rupa sehingga menghasilkan uap yang diharapkan. Permukaan bersirip biasanya digunakan untuk mempertinggi perpindahan panas, dan meningkatkan kecepatan perpindahan panas dari sebuah permukaan yang terlipat. Kalor konduksi pada suatu benda kadang harus dibuang ke lingkungan sekitar melalui proses konveksi. Dengan menggunakan proses konveksi yang mengharuskan aliran fluida berbenturan dengan sirip maka akan meningkatkan suhu uap. Aplikasi konstruksi sirip banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya, alat penukar kalor, motor bakar, trafo dan pendingin rangkaian elektronik.

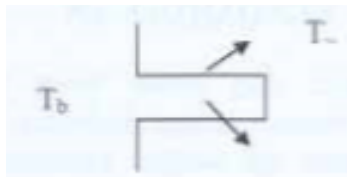
Pada perancangan sirip dalam yang bertujuan untuk memindahkan kalor dari permukaan sirip yang merupakan perpanjangan dari permukaan badan ketel pembangkit uap ke uap jenuh, maka asumsi yang digunakan adalah kondisi dimana kalor yang dikonduksikan pada permukaan sirip sama dengan kalor yang dikonveksikan oleh uap jenuh.

Pada penelitian ini, sirip yang digunakan yaitu sirip longitudinal (memanjang) dengan profil siku-empat.



Gambar 2.5 Pemakaian sirip untuk menambah laju perpindahan panas

Sirip (*fin*) sebagai salah satu bagian yang penting dari pembangkit uap superheat ini dirancang terlebih dahulu guna mendapatkan perpindahan kalor yang baik. Dengan $L = 40$ mm dan ketebalan $t = 0.35$ mm maka $L_c = L + t/2 = 40.175$ mm, sedangkan m merupakan parameter.



Gambar 2.6 *Fin*

Karena pada ujung sirip akan terjadi konveksi, maka diambil laju aliran kalor (q_f) adalah:

$$q_f = M \tanh mL_c \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan:

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA}} \text{ dan } M = \sqrt{hPkA}(T_b - T_\infty) \dots\dots\dots(2.8)$$

Jika h = koefisien konveksi *superheat* yang didekatkan dengan koefisien konveksi gas pada konveksi bebas yaitu $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ [6] dan P adalah perimeter dengan besar $P = 2(w+t)$ dengan t jauh lebih kecil dari pada w maka $P = 2w = 290\text{mm} = 0.29 \text{ m}$ dan $A_c = wt = 40\text{mm} \times 0.35\text{mm} = 50.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

Efisiensi sirip yang berbentuk *rectangular* adalah perbandingan laju kalor karena pemasangan sirip dengan laju kalor tanpa pemasangan sirip dimana kalor berpindah hanya dari proses konveksi uap jenuh biasa, yaitu:

$$\eta_f = \frac{q_f}{hA_f \theta_b} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan menggunakan rumus perpindahan kalor keseluruhan dalam alat pembangkit uap *superheat* antara lain menghitung luas A_b yaitu luas keseluruhan dari pembangkit uap *superheat*, A_f adalah luas permukaan sirip tunggal dan A_t adalah luas total, $A_t = A_b + NA_f$, dan N adalah jumlah sirip. Jika h merupakan koefisien dari *superheat* maka laju aliran kalor total pada sistem pembangkit uap *superheat* ini dapat dihitung menggunakan:

$$\begin{aligned} q_t &= q_b + Nq_f \\ &= hA_b(T_b - T_\infty) + N\eta_f hA_f(T_b - T_\infty) \dots\dots\dots (2.10) \end{aligned}$$

Untuk efisiensi permukaan seluruh sirip adalah perbandingan antara laju perpindahan kalor dari permukaan sirip secara keseluruhan dibandingkan dengan perpindahan kalor secara konveksi jika tanpa sirip yaitu:

$$\eta_o = \frac{q_t}{q_{\max}} = \frac{(N\eta_f hA_f + hA_b)\theta_b}{hA_t \theta_b} = \frac{N\eta_f A_f + A_b}{NA_f + A_b} \dots\dots (2.11)$$

Dimana A_t adalah luas permukaan keseluruhan dinding dan sirip yang ada. $A_t = A_b + NA_f$. A_b yaitu luas permukaan dinding dan NA_f yaitu luas permukaan sirip dikalikan dengan jumlah sirip.

2.4 Computational Fluid Dynamics

Computational fluid dynamics (CFD) merupakan metode penghitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya. Prinsipnya adalah suatu ruang yang berisi fluida yang akan dilakukan penghitungan dibagi-bagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel dan prosesnya dinamakan meshing. Bagian-bagian yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol penghitungan yang akan dilakukan oleh aplikasi atau software. Kontrol-kontrol penghitungan ini beserta kontrol-kontrol penghitungan lainnya merupakan pembagian ruang yang disebutkan tadi atau meshing. Nantinya, pada setiap titik kontrol penghitungan akan dilakukan penghitungan oleh aplikasi dengan batasan domain dan boundary condition yang telah ditentukan. Prinsip inilah yang banyak dipakai pada proses penghitungan dengan menggunakan bantuan komputasi komputer.

Simulasi berbasis CFD telah dikembangkan mulai tahun 1960an pada industri luar angkasa. Namun, saat ini simulasi CFD telah digunakan secara luas pada industri manufaktur hingga industri kimia. Keuntungan menggunakan CFD dalam analisa adalah *insight* (pemahaman mendalam), *foresight* (prediksi menyeluruh), dan *efficiency* (efisiensi waktu dan biaya).

Pemakaian CFD secara umum dipakai untuk memprediksi:

- Aliran dan panas
- Transfer massa
- Perubahan fasa seperti pada proses melting, pengembunan dan pendidihan
- Reaksi kimia seperti pembakaran
- Gerakan mekanis seperti piston dan fan
- Tegangan dan tumpuan pada benda solid
- Gelombang elektromagnet

CFD adalah penghitungan yang mengkhususkan pada fluida, mulai dari aliran fluida, *heat transfer* dan reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Atas prinsip-prinsip dasar mekanika fluida, konservasi energi, momentum, massa, serta species, penghitungan dengan CFD dapat dilakukan. Secara sederhana proses penghitungan yang dilakukan oleh aplikasi CFD adalah dengan kontrol-kontrol penghitungan yang telah dilakukan maka kontrol penghitungan tersebut akan dilibatkan dengan memanfaatkan persamaan-persamaan yang terlibat. Persamaan-persamaan ini adalah persamaan yang dibangkitkan dengan memasukkan parameter apa saja yang terlibat dalam domain. Misalnya ketika suatu model yang akan dianalisa melibatkan temperatur berarti model tersebut melibatkan persamaan energi atau konservasi dari energi tersebut. Inisialisasi awal dari persamaan adalah boundary condition. Boundary condition adalah kondisi dimana kontrol-kontrol perhitungan didefinisikan sebagai definisi awal yang akan dilibatkan ke kontrol-kontrol penghitungan yang berdekatan dengannya melalui persamaan-persamaan yang terlibat.

Aspek fisik dari aliran dinamik fluida didasarkan pada prinsip hukum kekekalan massa, momentum dan energi. Pada umumnya terdapat tiga tahapan untuk melakukan proses simulasi CFD, yaitu:

- *Preprocessing*
Preprocessing merupakan tahapan pertama untuk membangun dan menganalisis sebuah model CFD, yaitu dengan melakukan penggambaran geometri model, membuat *mesh* untuk membagi daerah komputasi menjadi sejumlah grid yang sesuai, menentukan parameter fisis dari kondisi batas model dan sifat-sifat fluidanya.
- *Processing* atau *solving*
Solving merupakan tahapan untuk menghitung kondisi-kondisi yang telah diterapkan pada saat *preprocessing*. Pada proses solving, perhitungan dilakukan dengan cara pendekatan numerik seperti elemen hingga, beda hingga serta volum hingga. Pada proses *solving* akan dilakukan iterasi hingga semua data yang dimasukkan dapat terhitung dan mencapai kondisi konvergen.

- *Postprocessing*

Postprocessing merupakan langkah terakhir dalam simulasi CFD yaitu mengorganisasi dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD yang berupa kontur gambar, plot grafik dan animasi. Visualisasi yang dapat ditampilkan pertama adalah kontur (*contour*) yang merupakan pola dari nilai parameter fisis yang disimulasikan seperti kontur kecepatan, tekanan dan *vorticity*. Kedua adalah vektor (*vector*) yang merupakan arah dari besaran seperti vektor kecepatan. Ketiga adalah bentuk aliran (*streamline*) yang merupakan pergerakan kontinyu fluida yang bergerak sepanjang ruang. Keempat adalah *particle track* yang merupakan lintasan partikel hasil diskritisasi.

2.4.1 *Boundary Condition*

Dalam menganalisa suatu aliran fluida terdapat dua metode yang dapat digunakan, yang pertama adalah mencari pola aliran secara detail (x, y, z) pada setiap titik atau yang kedua, mencari pola aliran pada suatu daerah tertentu dengan keseimbangan antara aliran masuk dan keluar dan menentukan (secara kasar) efek-efek yang mempengaruhi aliran tersebut (seperti: gaya atau perubahan energi). Metode pertama adalah metode analisa diferensial sedangkan yang kedua adalah metode integral atau control volume. Boundary conditions adalah kondisi dari batasan sebuah kontrol volume tersebut. Dalam analisa menggunakan CFD seluruh titik dalam kontrol volume tersebut dicari nilainya secara detail, seperti yang telah di jelaskan di awal bab ini, dengan memanfaatkan nilai-nilai yang telah diketahui pada boundary conditions. Secara umum *boundary conditions* terdiri dari dua macam, *inlet* dan *oulet*. Inlet biasanya didefinisikan sebagai tempat dimana fluida memasuki domain (*control volume*) yang ditentukan. Berbagai macam kondisi didefinisikan pada inlet ini mulai dari kecepatan, komposisi, temperatur, tekanan, laju aliran. Sedangkan pada outlet biasanya didefinisikan sebagai kondisi dimana fluida tersebut keluar dari domain atau dalam suatu aplikasi CFD merupakan nilai yang didapat dari semua variabel yang didefinisikan dan

diextrapolasi dari titik atau sel sebelumnya. Adapun untuk mencari seberapa besar nilai *inlet velocity* yaitu:

$$v = \frac{ms \cdot V}{3600\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

D = Diameter pipa (m)

ms = *steam flow rate* (kg/m)

V = *steam velocity* (m/s)

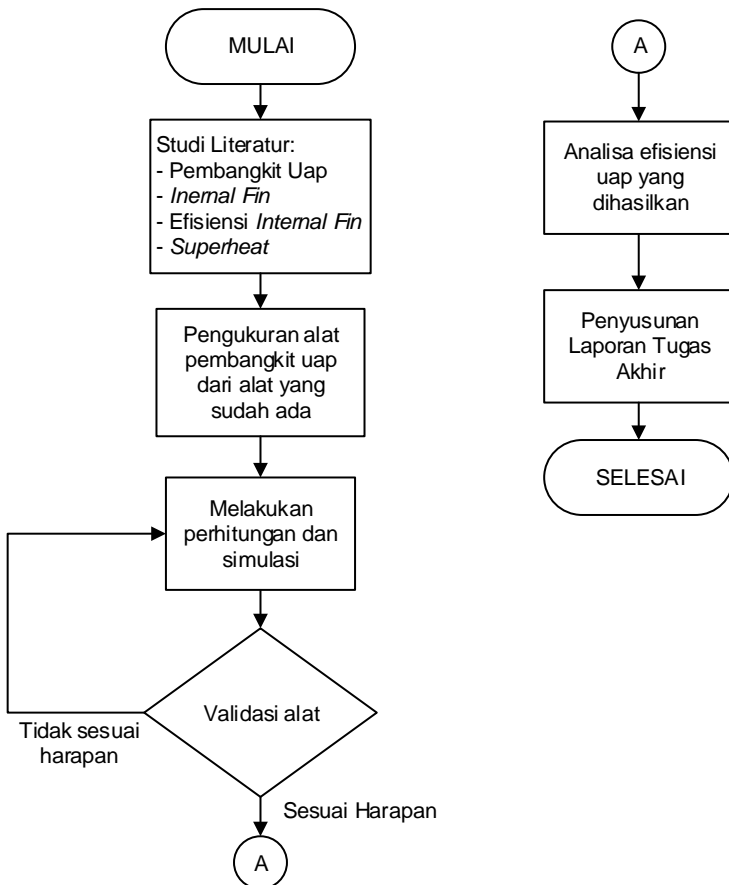
v = *volume* (m³/kg)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara umum tahapan penelitian tugas akhir ini dapat digambarkan dalam diagram alir seperti Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian tugas akhir

Untuk menunjang terlaksananya tugas akhir ini, maka langkah yang pertama dilakukan adalah menentukan apa saja yang akan menjadi materi atau acuan yang mendukung tugas akhir ini. Ini dilakukan agar dalam proses mengerjakan tugas akhir tidak keluar dari tujuan dan batasan masalah kenapa tugas akhir ini dilakukan. Materi yang sudah didapatkan dijadikan literatur. Literatur disini harus yang sudah diakui kebenarannya agar data dan hasil literatur tersebut mempunyai dasar-dasar teori yang kuat. Terdapat empat buah literature yang menjadi acuan yaitu tentang pembangkit uap, *internal fin*, efisiensi penggunaan berbagai *fin* kemudian *superheat* maksudnya agar sebelum melakukan tugas akhir ini dapat memahami system kerja nya.

Penelitian ini akan memodelkan perpindahan panas pada sebuah pembangkit uap *superheat*. Setelah desain alat pembangkit uap tersebut dilakukan dan kemungkinan konfigurasi selesai dilaksanakan, selanjutnya dilakukan pemodelan. Pemodelan diawali dengan pembuatan geometri *real plant*. Agar mendapatkan hasil simulasi yang baik, geometri *real plant* harus dibuat sesuai dengan desain aslinya agar terakhir dapat dibuat analisa perbandingan antara *real plant* dengan hasil pemodelan.

Sebelum melakukan pemodelan, langkah pertama lakukan pengukuran dimensi *real plant* agar pada saat proses pembuatan geometri di simulasi tidak ada perbedaan ukuran. Adapun data pengukuran yang harus diambil meliputi: panas laju aliran kalor yang terdapat pada ketel dengan mengukur panas yang dihasilkan oleh api dan temperature yang dihasilkan oleh air, waktu pemanasan air sampai mencapai titik didih 100°C, temperatur di sekitar dinding, temperatur di sekitar sirip, temperatur pada tempat objek.

Setelah dilakukan pengukuran, langkah selanjutnya adalah proses penghitungan dengan menggunakan rumus-rumus yang relevan agar mencapai suhu yang diinginkan. Hasil perhitungan-perhitungan ini yang digunakan sebagai masukan dalam *software* simulasi . Adapun proses yang dilakukan oleh software yaitu pertama preprocessing meliputi pembuatan geometri kemudian dilanjutkan processing yaitu perhitungan dilakukan dengan cara

pendekatan numerik seperti elemen hingga, beda hingga serta volum hingga meliputi proses *meshing* pada geometri. Proses *meshing* akan membagi-bagi geometri menjadi bagian-bagian kecil yang biasa disebut sebagai kontrol *volume*. Berbagai persamaan matematis dalam CFD seperti kekekalan momentum, kekekalan massa dan kekekalan energi akan digunakan untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap kontrol *volume*. Setelah dilakukan proses *meshing*, dilanjutkan dengan post-prosesing. Pada tahap ini merupakan langkah terakhir dalam simulasi CFD yaitu mengorganisasi dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD yang berupa kontur gambar, plot grafik dan animasi.

Pada validasi alat bertujuan untuk menyamakan hasil simulasi dengan hasil uji alat. Apabila hasil alat berbeda dengan hasil uji alat, maka perhitungan maupun syarat batas harus dilakukan pengecekan kembali. Apabila hasil simulasi dengan hasil uji alat sudah mendekati, maka syarat batas dan perhitungan sudah relevan.

Tahap selanjutnya yaitu menganalisa seberapa besar pengaruh sirip dalam (*fin*) terhadap kenaikan laju kalor dan temperatur.

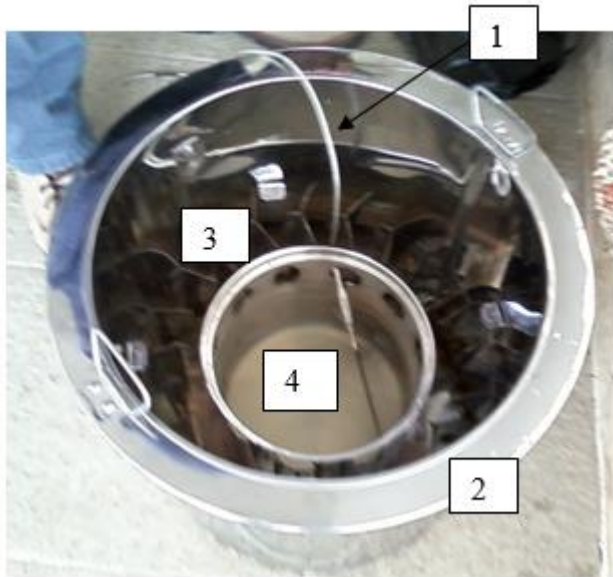
Terakhir, membuat laporan penelitian. Laporan meliputi hasil pengukuran data pada alat yang sesungguhnya, kemudian perhitungan dan apa saja yang dijadikan syarat batas pada *software* simulasi, hasil dari simulasi, kemudian perhitungan efisiensi penggunaan sirip dalam (*fin*) pada pembangkit uap superheat. Terakhir berikan kesimpulan dan saran agar kedepannya dapat dilakukan pengembangan yang terkait alat tersebut.

3.2 Alat Yang Dijadikan Bahan Penelitian

Penelitian atau tugas akhir ini menggunakan alat (*plant*) yang sudah ada yaitu berupa ketel uap. Berikut gambar dari *real plant* yang akan diteliti:



Gambar 3.2 Alat pembangkit uap *superheat*



Gambar 3.3 Prototipe pembangkit uap *superheat*

Keterangan Gambar :

1. Sensor Temperatur
2. Ketel pembangkit uap *Superheat*
3. Sirip dalam
4. *Boiler*

Generator uap *superheat* yang telah terintegrasi dengan boiler berkapasitas 10 lt dan sirip dalam maka uap *superheat* yang telah terbentuk akan dialirkan ke bagian tempat pemanasan/pengeringan (*Heating/Drying chamber*), laju aliran uap *superheat* akan dilakukan dengan mengukur selisih air pada boiler awal dan akhir dibagi dengan waktu pemanasan. Pengaturan laju aliran uap didapatkan dengan mengatur besarnya api pada gas *stove*.

3.3 Proses Simulasi

3.3.1 Preprocessing

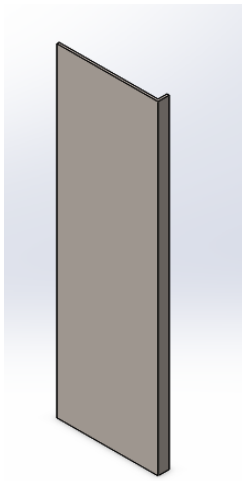
Preprocessing merupakan tahapan awal dalam membuat sebuah desain, yaitu dengan melakukan penggambaran geometri model, membuat *mesh* untuk membagi daerah komputasi menjadi sejumlah grid yang sesuai, menentukan parameter kondisi batas dari model yang akan diuji dengan menggunakan *software* SolidWorks. Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan yaitu:

1. Pembuatan Geometri

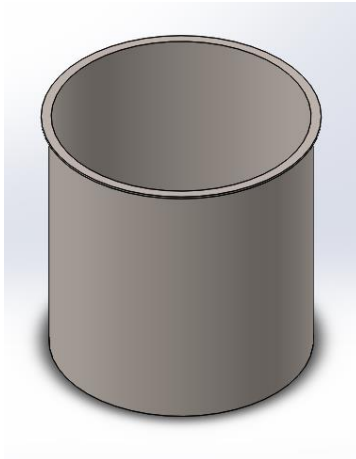
Pembuatan geometri dimulai dengan memasukkan data ukuran dimensi *real plant*.

Tabel 3.1 Tabel Ukuran Alat

	Prototipe
Diameter Pembangkit Superheat	330 mm
Jumlah sirip	23
Ukuran Fin	145 x 40 mm
Tebal Fin	0,35 mm

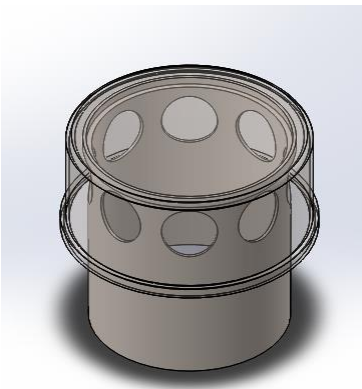


Gambar 3.4 *Fin* (Sirip)

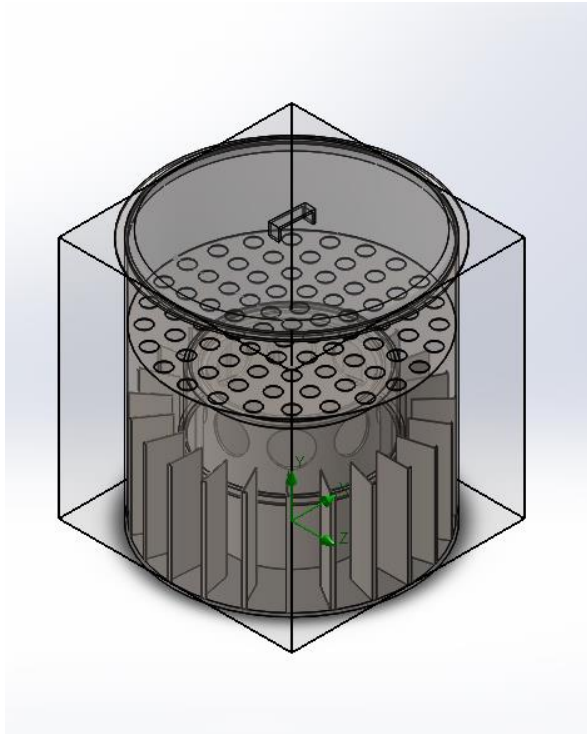


Gambar 3.5 Ketel uap

Proses pembuatan geometri tidak terlepas dari ukuran dari alat yang akan diteliti. Pada gambar 3.5 terlihat ketel pemanas air yang dilubangi agar uap jenuh yang dibiarkan bebas mengalir keluar dan diberi pengarah kearah bawah oleh penutup supaya aliran uap diharapkan berbenturan dengan sirip yang ada pada ketel uap.



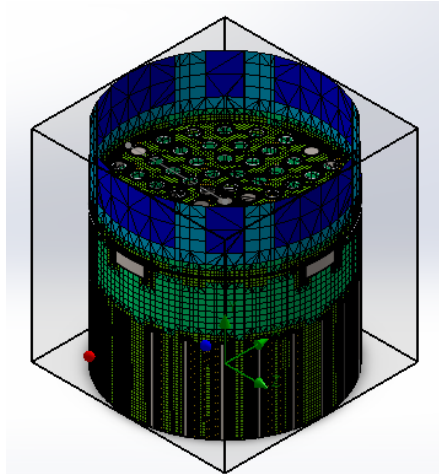
Gambar 3.6 Ketel pemanas air (*Boiler*)



Gambar 3.7 Geometri *real plant*

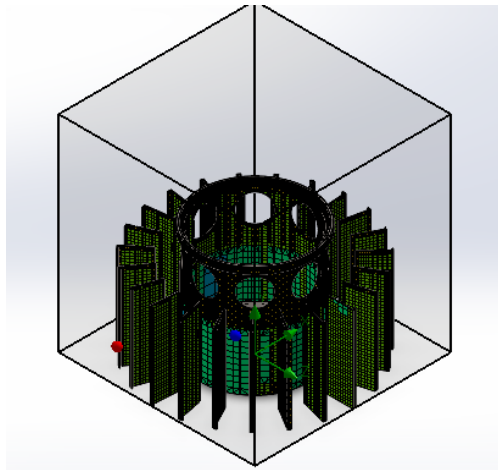
2. *Meshing*

Setelah pembuatan geometri dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah *meshing*. *Meshing* merupakan proses pemotongan bagian *surface* menjadi bagian yang lebih kecil-kecil. Bagian tersebut dianggap sebagai sebuah persamaan yang akan dilakukan perhitungan konservasi energi, massa, momentum dan persamaan lainnya.



Gambar 3.8 *Meshing* pada bagian dinding ketel uap

Dalam melakukan *meshing*, semakin kecil ukuran *meshing* maka akan didapatkan hasil yang mempunyai hasil akurasi yang lebih baik namun akan membutuhkan komputasi yang tinggi sehingga diperlukan komputer dengan kemampuan komputasi yang tinggi.



Gambar 3.9 *Meshing* pada bagian dalam ketel uap

Mesh dibuat secara rapat dan gradual atau sedikit demi sedikit ketika dekat dengan *surface* tiap-tiap bagian. Perubahan luas *mesh* yang bersebelahan dibuat sedikit berbeda dibuat menjadi semakin rapat dan mulai renggang ketika berada di bagian yang tidak bersebelahan. Ini dimaksudkan agar simulasi yang dilakukan dapat menjadi lebih akurat dan mendekati kondisi sebenarnya.

3.3.2 *Processing* atau *Solving*

Solving merupakan tahapan untuk menghitung kondisi-kondisi yang telah diterapkan pada saat *preprocessing*. Pada proses *solving*, perhitungan dilakukan dengan cara pendekatan numerik seperti elemen hingga, beda hingga serta volum hingga. Pada proses *solving* akan dilakukan iterasi hingga semua data yang dimasukkan dapat terhitung dan mencapai kondisi konvergen.

- *Preparation*

Untuk mengaktifkan flow simulation pada SolidWorks pastikan *add-in* sudah aktif.

Flow Simulation dapat menganalisa konduksi panas dalam media solid termasuk radiasi *surface to surface*. Begitu juga analisa transient (*time dependent*). Efek gravitasi juga dapat dimasukkan untuk analisa konveksi. Juga dapat untuk menganalisa *rotating equipment*.

Karena aliran alam penelitian ini merupakan jenis *internal flow*, maka perlu menambahkan *end cap* atau tutup pada ujung-ujung yang terbuka pada model. Pada *box setting type analysis* pilih *internal flow*. Konsep *internal flow* adalah aliran dalam suatu wadah atau aliran yang dibatasi oleh permukaan. Sedangkan *external flow* adalah suatu aliran yang *boundary layer* berhubungan dengan kondisi bebas, tanpa kendala yang dibatasi oleh permukaan yang berdekatan. Dengan demikian, akan selalu ada sebuah daerah *boundary layer* di mana kecepatan, temperatur, dan atau konsentrasi gradien diabaikan. Dalam kotak dialog ini abaikan *Exclude cavities without flow conditions*.

- *Type Fluida*

Default material fluida yang dipakai yaitu udara yang mana dalam masalah ini digunakan sebagai fluida kerja.

Dengan *Flow Simulation* mampu menghitung fenomena fluida dari berbagai jenis fluida dalam satu kerangka analisis, namun fluida tersebut harus dipisahkan oleh wall/batasan. Sebuah fluida hasil campuran hanya dianggap jika fluida dari tipe yang sama.

Flow Simulation memiliki *database* yang terintegrasi dengan beberapa tipe fluida, seperti liquid, gas dan solid. Solid digunakan untuk analisa konduksi panas. Anda dapat dengan mudah membuat jenis fluida sendiri. Sampai dengan sepuluh jenis fluida liquid atau gas dapat dipilih untuk masing-masing analisis ketika dijalankan.

Flow Simulation dapat menganalisa dengan semua jenis aliran yaitu aliran turbulen saja, laminar saja atau kombinasi dari laminar dan turbulen. Persamaan turbulen dapat diabaikan jika aliran sepenuhnya laminar. *Flow Simulation* juga bisa menghitung nilai *Mach number compressible flow* untuk gas. Untuk penelitian ini aliran fluida dengan standar *setting* yaitu kombinasi laminar dan turbulen.

- *Boundary Condition*

Sebuah *boundary condition* diperlukan sebagai jalan masuk atau keluar fluida pada sistem CFD dan dapat ditetapkan sebagai *Pressure*, *Mass Flow*, *Volume Flow* atau *Velocity*. Edit kondisi batas seperti dibawah ini:

- a) Nilai *Pressure* yang digunakan sebesar 101325 Pa sebagai default.
- b) Masukkan 0.0154248 m/s sebagai nilai *Inlet Velocity*. Nilai ini didapat dengan menggunakan persamaan (2.11).

Tabel 3.2 *Boundary Condition Inlet Velocity*

<i>Type</i>	<i>Inlet Velocity</i>
<i>Faces</i>	<i>Face<2>@INLET-1</i>
<i>Coordinate system</i>	<i>Face Coordinate System</i>
<i>Reference axis</i>	<i>X</i>
<i>Flow parameters</i>	<i>Flow vectors direction: Normal to face</i> <i>Velocity normal to face: 0.015 m/s</i> <i>Fully developed flow: Yes</i>
<i>Thermodynamic parameters</i>	<i>Approximate pressure: 101325.00 Pa</i> <i>Temperature: 393.20 K</i>

- c) Jika mengacu pada lamanya waktu yang dibutuhkan bagi air untuk mencapai temperature uapnya maka dapat diturunkan perhitungan laju kalor yang diberikan. Dengan menggunakan rumus laju kalor yang dibutuhkan untuk mencapai titik didih dari temperature awalnya maka dapat menggunakan persamaan 2.6. Jika massa awal air adalah 2 kg dan mencapai titik didihnya sebesar 100°C pada waktu 12.83 menit maka laju energi kalor yang diberikan adalah 766 W.
- d) Pada nilai temperature disekitar *fin* sebesar 250°C.

Tabel 3.3 *Real Wall 2*

<i>Type</i>	<i>Real wall</i>
<i>Faces</i>	<i>Fin</i>
<i>Coordinate system</i>	<i>Global coordinate system</i>
<i>Reference axis</i>	<i>X</i>
<i>Heat transfer coefficient</i>	<i>25.000 W/m²/K</i>
<i>Dynamic boundary layer thickness</i>	<i>0 m</i>
<i>Wall temperature</i>	<i>523 K</i>

- e) Besar temperatur suhu pada sekitar dinding yaitu 314°C

Tabel 3.4 *Reall Wall 1*

<i>Type</i>	<i>Real wall</i>
<i>Faces</i>	<i>Face<1>@MAIN-1</i>
<i>Coordinate system</i>	<i>Face Coordinate System</i>
<i>Reference axis</i>	X
<i>Heat transfer coefficient</i>	25.000 W/m ² /K
<i>Dynamic boundary layer thickness</i>	0 m
<i>Wall temperature</i>	587.00 K

- f) Jika koefisien konveksi *superheat* (h) yang didekatkan dengan koefisien konveksi gas pada konveksi bebas yaitu 2-25 W/m².K. Sedangkan karena uap *superheat* memiliki sifat-sifat yang tinggi terhadap udara maka h-nya juga tinggi, dengan demikian dipilih h=25 W/m²K. Maka qf dapat dihitung dengan rumus 2.7.
- g) Jika A_b adalah permukaan dinding, A_f adalah luas permukaan sirip tunggal dan A_t adalah luas total, maka A_t = A_b+NA_f dan N adalah jumlah sirip.
- h) Pastikan *outlet boundary layer* pada *static pressure* sebagai *default* karena ketel ini merupakan

Tabel 3.5 *Static Pressure*

<i>Type</i>	<i>Static Pressure</i>
<i>Coordinate system</i>	<i>Global coordinate system</i>
<i>Reference axis</i>	X
<i>Thermodynamic parameters</i>	<i>Static pressure: 101325.00 Pa</i> <i>Temperature: 295.00 K</i>
<i>Boundary layer parameters</i>	<i>Boundary layer type: Turbulent</i>

Tabel 3.6 *Material Setting Fluid Subdomains*

<i>Default fluid type</i>	<i>Gas/Steam/Real Gas</i>
<i>Fluids</i>	<i><u>Steam</u></i>
<i>Faces</i>	<i>Face<1>@INLET-1</i>
<i>Coordinate system</i>	<i>Face Coordinate System</i>
<i>Reference axis</i>	<i>X</i>
<i>Thermodynamic Parameters</i>	<i>Static Pressure: 101325.00 Pa Temperature: 293.20 K</i>
<i>Velocity Parameters</i>	<i>Velocity in X direction: 0 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s</i>
<i>Turbulence parameters type:</i>	<i>Turbulence intensity and length</i>
<i>Intensity</i>	<i>2.00 %</i>
<i>Length</i>	<i>1.000e-004 m</i>
<i>Flow type</i>	<i>Laminar and Turbulent</i>

- ***Operating Condition***

Pengaturan kondisi operasi tergantung pada tekanan operasi yang digunakan dalam keadaan sebenarnya. Jika total tekanan yang dimiliki sebesar 101325 Pa, maka ketika operating *pressure* 101325 Pa ini menunjukkan bahwa wilayah kerja berada di *atmosphere*. Tetapi jika sebaliknya, maka wilayah kerja nya berada di lingkungan bebas tekanan.

- ***Engineering Goal***

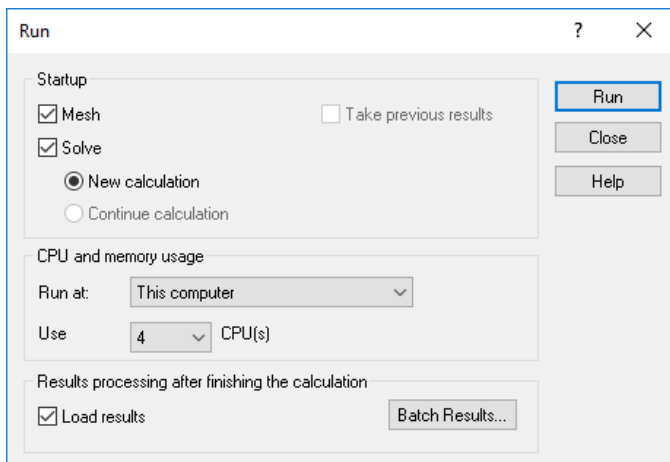
Engineering Goal adalah parameter yang ditekankan dalam *output*. Pada dasarnya adalah merupakan cara untuk menyampaikan ke proses perhitungan *Flow Simulation* sehingga mengurangi waktu untuk mencapai solusi yang konvergen. *Engineering Goal* dapat diatur dalam *global domain* (*Global Goals*), dalam *volume domain* (*Volume Goals*), di daerah *surface domain* (*Surface Goals*), atau *point domain* (*Point Goals*). Selanjutnya, *Flow Simulation* dapat mempertimbangkan rata-rata nilai, nilai minimum atau nilai maksimum untuk tujuan

tertentu. Ini juga dapat menentukan suatu persamaan yang merupakan tujuan yang didefinisikan oleh persamaan yang melibatkan fungsi matematika dasar dengan tujuan sebagai variabel. Tujuan persamaan memungkinkan Anda untuk menghitung parameter (yaitu, penurunan tekanan) dan lain-lain.

- ***Solution***

Tahap penentuan kondisi yang terakhir yaitu kondisi solusi yang diharapkan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Beberapa parameter kondisi solusi yang digunakan yakni:

- a) Klik *Run calculation*.
- b) Centang kolom *Mesh* agar *mesh* yang sudah diatur sebelumnya dapat ikut *running* dalam program. Centang juga *solve* agar perhitungan pada *software* dapat tercapai.
- c) Klik *Run*. Ini agar memulai proses *calculating* syarat batas yang sudah ditentukan.



Gambar 3.10 Kolom *run*

3.3.3 *Postprocessing*

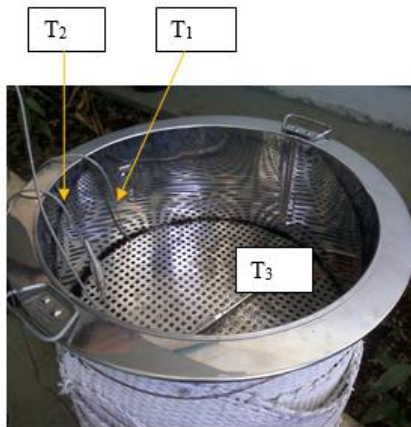
Postprocessing merupakan proses terakhir dalam simulasi dimana hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu. Pada tahap ini dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Selain itu dilakukan visualisasi hasil simulasi meliputi kontur tekanan dan *streamline*.

BAB IV

DATA DAN ANALISA PEMBAHASAN

4.1 Data Pengukuran

Pengukuran Termometer menggunakan Termokopel tipe K dengan pembacaan menggunakan instrumen Lutron. Eksperimen pertama pembacaan data dilakukan secara manual namun eksperimen selanjutnya dilakukan dengan pengambilan data secara langsung dengan RS232 dan kabel USB sehingga data dapat langsung diakuisisi dengan komputer.



Gambar 4.1 Titik yang diukur

Adapun parameter yang diukur antara lain :

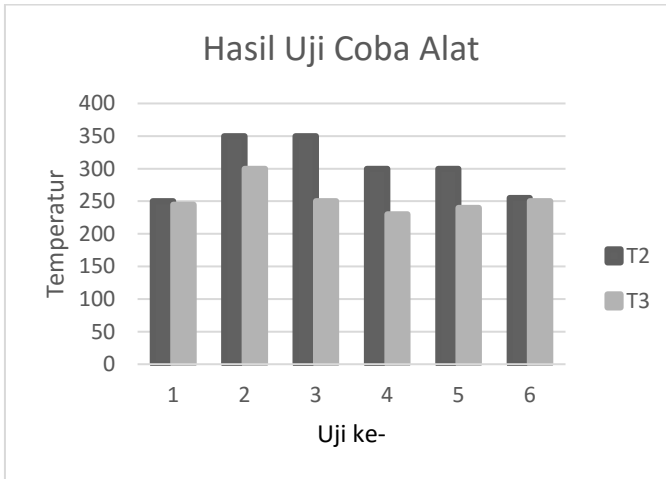
T1 = Temperatur air

T2 = Temperatur sirip

T3 = Temperatur uap *superheat*

Tabel 4.1 Data Pengukuran

No	Bagian	Pengukuran 1	Pengukuran 2	Pengukuran 3	Pengukuran 4	Pengukuran 5	Pengukuran 6
1	Dinding	314°C	314°C	314°C	314°C	314°C	314°C
2	Waktu	3900 s	3600 s	4200 s	3900 s	3600 s	3600 s
3	Sirip (<i>Fin</i>) (T2)	250°C	350°C	350°C	300°C	300°C	255°C
4	Bagian Objek (T3)	245°C	300°C	250°C	230°C	240°C	250°C



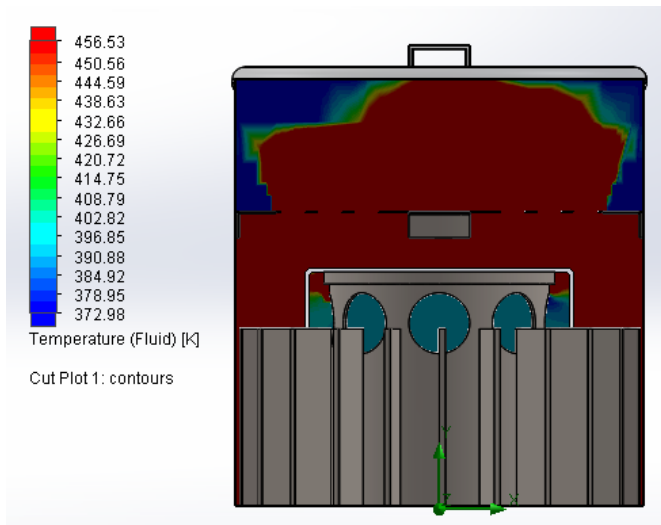
Gambar 4.2 Grafik hasil uji coba

Dari hasil percobaan alat, didapat berbagai temperatur. Adapun perbedaan temperatur yang dihasilkan karena dipengaruhi oleh debit uap air yang masuk, laju uap kemudian laju kalor dari gas dan energi kalor yang dihasilkan dari gas.

Sehingga dari enam kali percobaan, maka disimpulkan bahwa percobaan yang keenam bisa dikatakan baik karena didasari dari suhu yang baik untuk makanan sehingga terjaganya kandungan gizi dan kualitas yang menjadi syarat makanan sehat.

4.2 Data Hasil Simulasi

4.2.1 *Cut Plot Surface 2D*

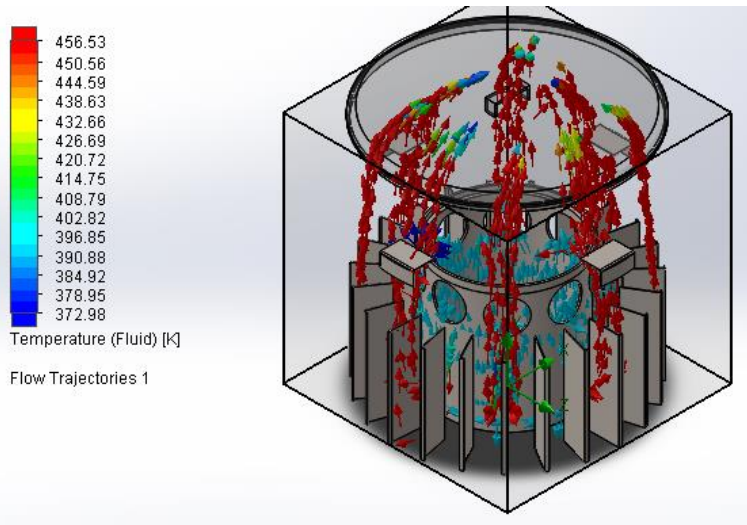


Gambar 4.3 *Cut plot 2D*

Terlihat pada gambar hasil plot 2D dimana daerah yang berwarna merah munjukan temperatur yang paling tinggi mencapai 500°K atau 227°C . Suhu uap jenuh yang berwarna biru muda dengan temperatur sekitar 390°K atau 117°C yang menabrak dinding dan menabrak sirip-sirip sehingga aliran fluida terjadi secara laminar dan turbulensi yang mengakibatkan kenaikan suhu dalam ruangan. Sesuai dengan rumus konveksi, suhu akan naik apabila terjadi tabrakan-tabrakan fluida dengan benda di sekitarnya dan juga dipengaruhi oleh bentuk aliran fuida tersebut. Semakin banyak terjadi turbulensi maka suhu akan semakin tinggi.

4.2.2 Cut Pot 3D

Selain dengan 2D, dapat dilihat secara 3D perubahan suhu dan aliran fluida yang terjadi pada ketel.

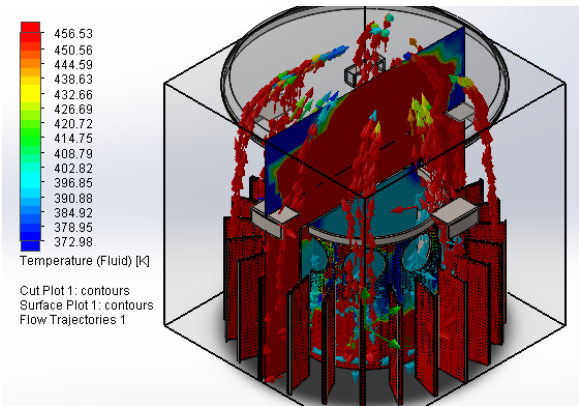


Gambar 4.4 Cut plot 3D

Secara 3D terlihat arah-arrah fluida yang mengalir dalam ketel. Dengan demikian dapat dengan mudah untuk mengetahui arah yang mengalir akibat fluida menabrak bentuk geometri sekaligus dapat melihat suhu akibat tabrakan dengan geometri.

Dapat dilihat juga bahwa aliran fluida yang mengalir setelah melewati sirip-sirip mengalami peningkatan suhu sampai maksimal sebesar 500°K atau 227°C.

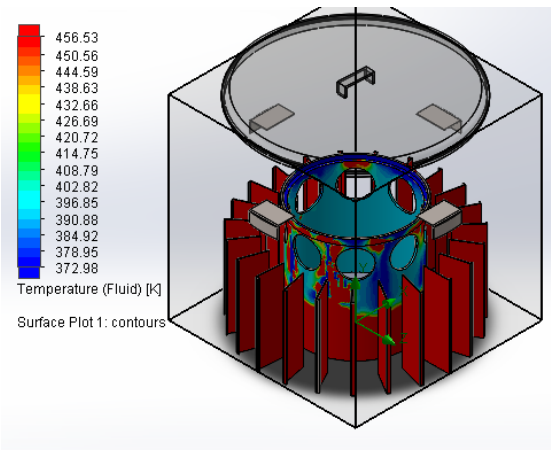
4.2.3 *Surface Plot*



Gambar 4.5 *Surface plot*

Di sepanjang aliran fluida yang masih bersifat jenuh mengalir dan menabrak penutup dan menabrak fn dengan demikian uap jenuh telah berganti fasa menjadi uap *superheat*.

4.2.4 *Suhu Pada Fin*



Gambar 4.6 *Suhu pada fin*

Dengan menggunakan rumus konveksi yang terjadi pada sekitar fin, maka didapat nilai suhu yang dijadikan sebagai *real wall* (masukan dalam *software*). Terlihat pada hasil plot, suhu pada fin berkisar 500°K atau 227°C.

4.3 Analisa

4.3.1 Perhitungan Berdasarkan Pengukuran

Berdasarkan hasil pengukuran, dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai laju kalor dan efisiensi sirip yang terjadi dalam ketel. Dengan $L = 40$ mm dan ketebalan $t = 0,35$ mm maka $L_c = L + t/2 = 40,175$ mm dan jika h = koefisien konveksi *superheat* yang didekatkan dengan koefisien konveksi gas pada konveksi bebas yaitu $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ dan P adalah perimeter dengan besar $P = 2(w+t)$ dengan t jauh lebih kecil dari pada w maka $P = 2w = 290\text{mm} = 0,29 \text{ m}$ dan $A_c = wt = 40\text{mm} \times 0,35\text{mm} = 50,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Efisiensi sirip yang berbentuk *rectangular* adalah perbandingan laju kalor karena pemasangan sirip dengan laju kalor tanpa pemasangan sirip dimana kalor berpindah hanya dari proses konveksi uap jenuh biasa, yaitu dengan menggunakan persamaan (2.9). Dimana q_f dapat diambil dari persamaan (2.7) dan $\theta_b = T_b - T_\infty$ dengan T_b adalah temperature pada sirip yang menunjukkan temperature 314°C dan T_∞ yaitu temperatur udara di sekitar sirip yang diukur oleh termokopel 2 yang menunjukkan temperature 250°C maka q_f dapat dihitung dengan menghitung m terlebih dahulu dengan hasilnya sebesar 0,075 sehingga didapat laju kalor pada sirip yaitu:

$$q_f = 0.075 \times (314 - 250) \times 0.999 = 4.8 \text{ W}$$

Sedangkan untuk laju aliran kalor karena konveksi adalah :

$$q_{\max} = hA_f\theta_b = 25 \times 40 \times 145 \times 10^{-6} \times 64 = 9.28 \text{ W}$$

Maka efisiensi siripnya seperti yang ditunjukkan pada persamaan

$$(2.9) \text{ menjadi: } \eta_f = \frac{4.8}{9.28} = 52\%$$

Salah satu perhitungan perpindahan kalor keseluruhan antara lain menghitung luas A_b yaitu luas keseluruhan dari pembangkit uap *superheat*, A_f adalah luas permukaan sirip tunggal dan A_t adalah luas total, $A_t = A_b + NA_f$, dan N adalah jumlah sirip. Untuk

itu maka laju aliran kalor total pada sistem pembangkit uap superheat ini dimana N (jumlah sirip) = 23, Luas sirip = $40 \times 145 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, Luas dinding yang berbentuk silinder adalah $\pi \times 330 \times 340 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ dan Temperatur dinding (T_b) = 314°C sedangkan temperatur uap superheat di sekitar sirip (T_∞) = 255°C sehingga didapat besaran kalor dengan menggunakan rumus 2.10 sehingga didapat hasil nya sebesar 622,34 W.

Untuk efisiensi permukaan seluruh sirip adalah perbandingan antara laju perpindahan kalor dari permukaan sirip secara keseluruhan dibandingkan dengan perpindahan kalor secara konveksi jika tanpa sirip yaitu dengan menggunakan persamaan (2.11) sehingga didapat sebesar 85,67%.

4.3.2 Analisa Perhitungan Berdasarkan Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi, dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai laju kalor dan efisiensi sirip yang terjadi dalam ketel. Dengan $L = 40 \text{ mm}$ dan ketebalan $t = 0,35 \text{ mm}$ maka $L_c = L + t/2 = 40,175 \text{ mm}$ dan jika h = koefisien konveksi *superheat* yang didekatkan dengan koefisien konveksi gas pada konveksi bebas yaitu $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ dan P adalah perimeter dengan besar $P = 2(w+t)$ dengan t jauh lebih kecil dari pada w maka $P = 2w = 290 \text{ mm} = 0,29 \text{ m}$ dan $A_c = wt = 40 \text{ mm} \times 0,35 \text{ mm} = 50,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Efisiensi sirip yang berbentuk *rectangular* adalah perbandingan laju kalor karena pemasangan sirip dengan laju kalor tanpa pemasangan sirip dimana kalor berpindah hanya dari proses konveksi uap jenuh biasa, yaitu dengan menggunakan persamaan (2.9). Dimana q_f dapat diambil dari persamaan (2.7) dan $\theta_b = T_b - T_\infty$ dengan T_b adalah temperature pada sirip yang ditunjukan oleh simulasi sebesar 314°C dan T_∞ yaitu temperature udara di sekitar sirip yang menunjukkan temperature 227°C maka q_f dapat dihitung dengan menghitung m terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan (2.8) hasilnya sebesar 0,075 sehingga didapat laju kalor pada sirip yaitu: $q_f = 0,075 \times (314 - 227) \times 0,999 = 6,5 \text{ W}$. Sedangkan untuk laju aliran kalor karena konveksi berdasarkan hasil simulasi adalah : $q_{\max} = 25 \times 40 \times 145 \times 10^{-6} \times (314 - 227) = 12,615 \text{ W}$. Maka

efisiensi siripnya seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.9) menjadi: $\eta_f = \frac{6,5}{12,615} = 51,5 \%$

Untuk perhitungan perpindahan kalor keseluruhan antara lain menghitung luas A_b yaitu luas keseluruhan dari pembangkit uap *superheat*, A_f adalah luas permukaan sirip tunggal dan A_t adalah luas total, $A_t = A_b + NA_f$, dan N adalah jumlah sirip. Untuk itu maka laju aliran kalor total pada sistem pembangkit uap *superheat* ini dimana N (jumlah sirip) = 23, Luas sirip = $40 \times 145 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, Luas dinding yang berbentuk silinder adalah $\pi \times 330 \times 340 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ dan Temperatur dinding (T_b) = 314°C sedangkan temperatur uap *superheat* di sekitar sirip (T_∞) = 227°C sehingga didapat besaran kalor dengan menggunakan persamaan (2.10) sehingga didapat hasil nya sebesar 917,5 W.

Hasil simulasi juga mempunyai nilai seberapa besar efisiensi menyeluruh sirip dibandingkan dengan pembangkit yang tidak bersirip. Menggunakan persamaan (2.11) didapat laju perpindahan kalor dari permukaan sirip secara keseluruhan yaitu sebesar 85,51%.

4.4 Validasi Proses

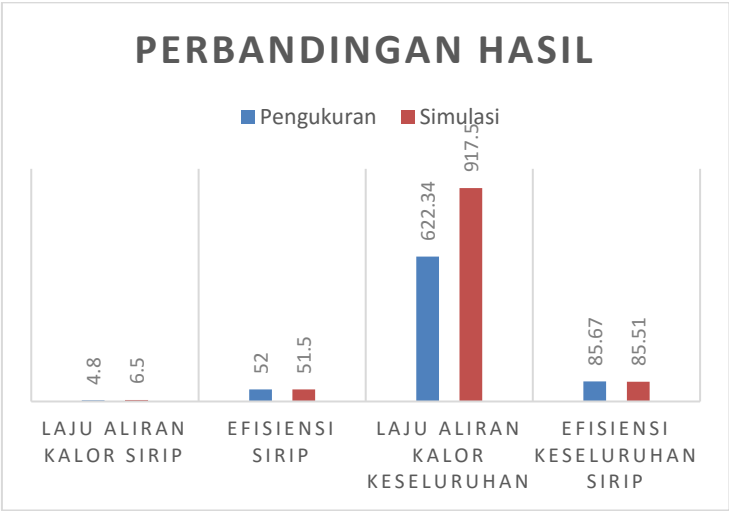
Validasi merupakan proses penting dari sebuah penelitian yang berbasis simulasi. Dengan melakukan validasi maka dapat diketahui kesesuaian uji coba dengan kondisi acuan yang dituju. Penelitian ini melakukan validasi mengacu berdasarkan perbandingan antara hasil pengukuran alat dengan hasil simulasi.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran

Laju aliran kalor sirip	4,8 W
Efisiensi Sirip	52 %
Laju aliran kalor keseluruhan	622,34 W
Efisiensi keseluruhan sirip	85,67 %

Tabel 4.2 Hasil Simulasi

Laju aliran kalor sirip	6,5 W
Efisiensi Sirip	51,5 %
Laju aliran kalor keseluruhan	917,5 W
Efisiensi keseluruhan sirip	85,51 %



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Hasil Perhitungan

4.5 Pembahasan

Dari hasil pengukuran didapat laju aliran kalor sirip sebesar 4,8 W sedangkan hasil simulasi didapat laju aliran kalornya sebesar 6,5 W. Ini terjadi akibat perbedaan suhu berdasarkan hasil pengukuran dan hasil simulasi. Jika hasil pengukuran didapat suhu di sekitar sirip yaitu sekitar 250°C sedangkan hasil simulasi menunjukkan suhu sebesar 227°C. Kesalahan pembacaan alat ukur maupun peletakan alat ukur bisa saja terjadi sehingga terjadi perbedaan antara hasil pengukuran dan hasil simulasi.

Kemudian dilihat dari hasil efisiensi sirip berdasarkan hasil pengukuran yaitu sebesar 52% sedangkan hasil simulasi yaitu

sebesar 51,5%. Dapat dilihat bahwa tinggi nya nilai efisiensi ini membuktikan bahwa ini dapat meningkatkan jumlah kalor yang melewati sirip sehingga perubahan suhu yang terjadi dari suhu rendah mengalami peningkatan suhu. Ini dapat dibuktikan dengan persamaan (2.2) bahwa ini terjadi akibat perpindahan panas secara konveksi. Perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir disekitarnya, dengan menggunakan media penghantar berupa fluida.

Melihat dari laju aliran kalor secara menyeluruh antara lain dipengaruhi oleh luas A_b yaitu luas keseluruhan dari pembangkit uap *superheat*, A_f adalah luas permukaan sirip tunggal dan A_t adalah luas total, $A_t = A_b + NA_f$, dan N adalah jumlah sirip. Untuk itu maka laju aliran kalor total pada sistem pembangkit uap *superheat* ini dimana N (jumlah sirip). Hasil pengukuran yang telah dilakukan didapat sebesar 622,34W sedangkan hasil simulasi besar nilai laju aliran kalornya yaitu 917,5 W. Ini bisa saja terjadi akibat perbedaan suhu yang mengalir dalam ketel uap secara menyeluruh. Dapat dibuktikan dengan perhitungan menggunakan persamaan (2.10) bahwa perbedaan terletak pada nilai suhu.

Secara menyeluruh, keberadaan atau proses penambahan sirip di dalam ketel atau pembangkit uap *superheat* ini dapat dikatakan bekerja sesuai fungsinya karena setelah fluida melewati sirip-sirip tersebut, rata-rata suhunya semakin meningkat. Ini membuktikan bahwa hukum termodinamika mengenai perpindahan panas yaitu adalah suatu bentuk energi yang berpindah dari suatu badan atau sistem ke badan yang lain atau sistem sekitarnya. Jadi panas dapat pindah melewati batas suatu sistem, menuju atau dari sistem. Perpindahan panas ini terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara sistem dan sekitarnya. Dilihat dari efisiensi secara menyeluruh didapat hasil berdasarkan pengukuran sebesar 85,67% dan hasil simulasi menunjukkan 85,51%.

Walaupun secara menyeluruh terjadi perbedaan angka, tetapi ini dapat dibuktikan bahwa perbedaan tersebut bisa terjadi akibat beberapa faktor, antara lain akibat salah pembacaan alat ukur maupun peletakan alat ukur.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, analisa, dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Berdasarkan pengukuran, uap *superheat* berhasil dibangkitkan yaitu dengan indikasi temperature uap yang dihasilkan sekitar 250⁰C
- Temperatur uap *superheat* yang dihasilkan alat dengan temperatur yang dihasilkan simulasi tidak jauh berbeda. Temperatur yang dihasilkan simulasi sebesar 227°C.
- Penggunaan sirip menunjukkan bahwa ketercapaian temperatur uap *superheat* dipengaruhi oleh laju aliran kalor

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian ini, maka didapat beberapa saran untuk kedepannya agar penelitian ini dapat lebih sempurna, antara lain:

- Melakukan pengukuran dan uji alat dengan tepat agar dalam menentukan parameter dan masukan pada *software* dapat sesuai dengan uji alat
- Tidak perlu menambah parameter untuk dijadikan parameter dalam *software* agar proses running dapat berjalan dengan cepat untuk menghasilkan nilai yang konvergen

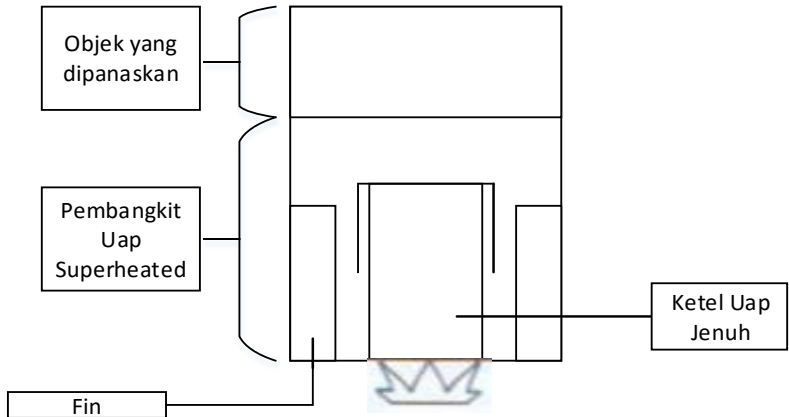
Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Arun Mujumundar, Sakamon Devahastin, *Drying Technology*, 22,p 1845-1867, 2004
- [2]. Cengel Yunus, Bols Michael, *Thermodynamic an Engineering Approach*, (1994) Mc Graw Hill, Inc
- [3]. *Fin Tutorial*, Fluent Inc (Flow Lab), (2007), www.engr.iupui.edu/thermal, diakses tanggal 15-9-2016
- [4]. Incropera, F.P and DeWitt,D.P, *Fundamental of Heat and Mass Transfer*, 4th Ed (1996), John Wiley & Son, Canada
- [5]. Nishimura,N.Nomura,T and Ueda,S , *Heat and Mass Transfer With Water Evaporation into superheated Steam*(1989).Mem.Fac.Eng.Osaka City Univ.30,1-10
- [6]. Nuryanti,Adhitya Sumardi,Suyono, *Pengaruh Penerapan sirip Dalam (Internal Fin) Untuk Mengasilkan Uap Superheat pada Pembangkit Uap*, Jurnal Teknik Mesin vol 14, No1, April 2013,35-39
- [7]. Tomone Amatsubo, Yoshio Hagura, Kanichi Suzuki, *Heat Transfer Characteristic of Superheat Steam Combined with Far Infra red*, Food Science Technology, Res, 11(4),p 363-368, 2005
- [8]. <http://www.barrosin.com/products/super-heated-steam-drying.asp>, diakses tgl 18-9-2016
- [9]. http://www.ohio.edu/mechanical/thermo/Intro/Chapt.1_6/Chapter2a.html6, diakses tanggal 15-9-2016
- [10]. <https://fauzanahmad.wordpress.com/> , diakses tanggal 14-12-2016

LAMPIRAN A

A. Desain Pembangkit Uap *Superheat*



Gambar 1. Desain



Gambar 2. Tampak Atas



Gambar 3. Tampak Atas Menggunakan Pengarah Uap



Gambar 4. Tampak Atas Menggunakan Penampang Untuk Makanan



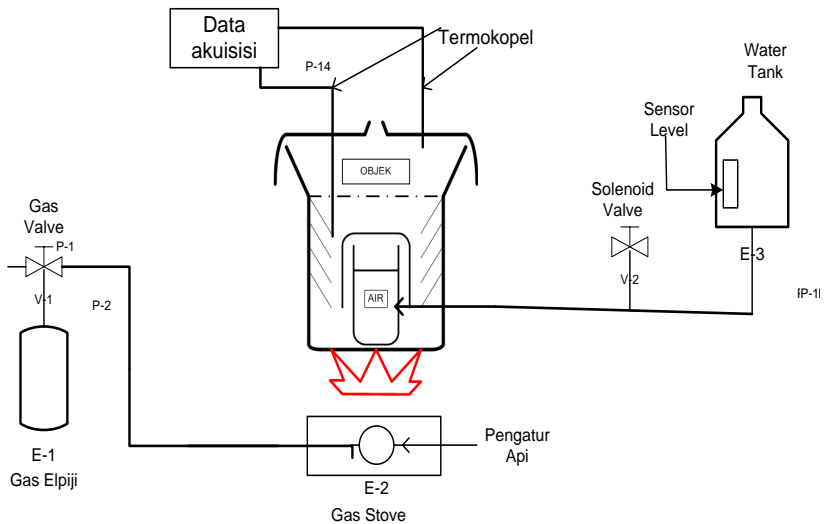
Gambar 5. Proses Pengukuran 1



Gambar 6. Proses Pengukuran 2

LAMPIRAN B

A. Proses Pengukuran

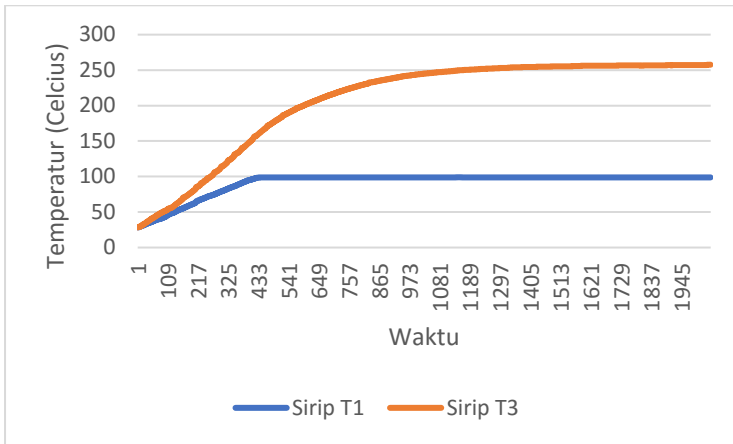


Gambar 1. Proses Pengukuran

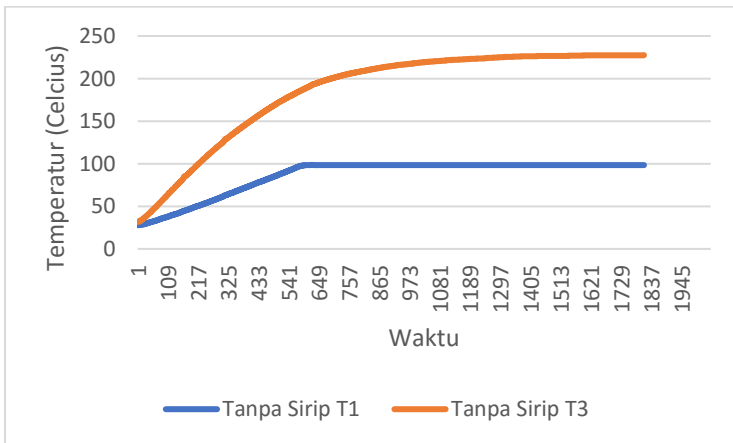
Pengukuran Termometer menggunakan Termokopel tipe K dengan pembacaan menggunakan instrumen Lutron. Eksperimen pertama pembacaan data dilakukan secara manual namun eksperimen selanjutnya dilakukan dengan pengambilan data secara langsung dengan RS232 dan kabel USB sehingga data dapat langsung diakuisisi dengan komputer. Pada proses pembacaan tersebut dilakukan secara sampling sebanyak 2049 data perjam atau 34.15 data per menit.

LAMPIRAN C

A. Uji Coba Menggunakan *Internal Fin*



B. Uji Coba Tidak Menggunakan *Internal Fin*



Pada kedua gambar dapat ditunjukkan perbandingan antara menggunakan sirip dan tidak menggunakan sirip terlihat bahwa dengan menggunakan sirip temperature yang dicapai 255°C sedangkan jika tanpa menggunakan sirip temperatur mencapai 225°C .

LAMPIRAN D

A. Rekap Uji Coba

No	Vair (awal) (l)	Vair (akhir) (l)	Mgas (awal)[kg]	Mgas (akhir)[kg]	t(s)
1	3	1.65	24.9	24.21	3900
2	2	0.75	24.21	23.34	3600
3	2	1	23.34	22.74	4200
4	2	1.225	22.73	22.3	3900
5	2	0.75	22.29	21.42	3600
6	4	1.6	18.2	17.22	3600

LAMPIRAN E

A. Tabel Properties Suhu Superheated Water

Superheated water												
<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*				<i>P</i> = 0.05 MPa (81.32°C)				<i>P</i> = 0.10 MPa (99.61°C)				
Sat. ¹	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
<i>P</i> = 0.20 MPa (120.21°C)				<i>P</i> = 0.30 MPa (133.52°C)				<i>P</i> = 0.40 MPa (143.61°C)				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1273
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
<i>P</i> = 0.50 MPa (151.83°C)				<i>P</i> = 0.60 MPa (158.83°C)				<i>P</i> = 0.80 MPa (170.41°C)				
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.4	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

Superheated water (Concluded)												
<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>P</i> = 1.00 MPa (179.88°C)				<i>P</i> = 1.20 MPa (187.96°C)				<i>P</i> = 1.40 MPa (195.04°C)				
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
<i>P</i> = 1.60 MPa (201.37°C)				<i>P</i> = 1.80 MPa (207.11°C)				<i>P</i> = 2.00 MPa (212.38°C)				
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791

Superheated water (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K		
<i>P</i> = 4.0 MPa (250.35°C)					<i>P</i> = 4.5 MPa (257.44°C)					<i>P</i> = 5.0 MPa (263.94°C)				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737		
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571		
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111		
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516		
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483		
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210		
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781		
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605		
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136		
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458		
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619		
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648		
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566		
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388		
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124		
<i>P</i> = 6.0 MPa (275.59°C)					<i>P</i> = 7.0 MPa (285.83°C)					<i>P</i> = 8.0 MPa (295.01°C)				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450		
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937		
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321		
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658		
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579		
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266		
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800		
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221		
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822		
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185		
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372		
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419		
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350		
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181		
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925		
<i>P</i> = 9.0 MPa (303.35°C)					<i>P</i> = 10.0 MPa (311.00°C)					<i>P</i> = 12.5 MPa (327.81°C)				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638		
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596						
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130		
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433		
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749		
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651		
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317		
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828		
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227		
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540		
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967		
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195		
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269		
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220		
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065		
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819		

Superheated water (Concluded)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K		
<i>P</i> = 15.0 MPa (342.16°C)					<i>P</i> = 17.5 MPa (354.67°C)					<i>P</i> = 20.0 MPa (365.75°C)				
Sat.	0.010341	2455.7	2610.8	5.3108	0.007932	2390.7	2529.5	5.1435	0.005862	2294.8	2412.1	4.9310		
350	0.011481	2520.9	2693.1	5.4438										
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526		
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043		
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446		
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390		
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075		
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593		
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991		
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531		
900	0.035503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829		
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950		
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933		
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802		
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574		
<i>P</i> = 25.0 MPa					<i>P</i> = 30.0 MPa					<i>P</i> = 35.0 MPa				
375	0.001978	1799.9	1849.4	4.0345	0.001792	1738.1	1791.9	3.9313	0.001701	1702.8	1762.4	3.8724		
400	0.006005	2428.5	2578.7	5.1400	0.002798	2068.9	2152.8	4.4758	0.002105	1914.9	1988.6	4.2144		
425	0.007886	2607.8	2805.0	5.4708	0.005299	2452.9	2611.8	5.1473	0.003434	2253.3	2373.5	4.7751		
450	0.009176	2721.2	2950.6	5.6759	0.006737	2618.9	2821.0	5.4422	0.004957	2497.5	2671.0	5.1946		
500	0.011143	2887.3	3165.9	5.9643	0.008691	2824.0	3084.8	5.7956	0.006933	2755.3	2997.9	5.6331		
550	0.012736	3020.8	3339.2	6.1816	0.010175	2974.5	3279.7	6.0403	0.008348	2925.8	3218.0	5.9093		
600	0.014140	3140.0	3493.5	6.3637	0.011445	3103.4	3446.8	6.2373	0.009523	3065.6	3399.0	6.1229		
650	0.015430	3251.9	3637.7	6.5243	0.012590	3221.7	3599.4	6.4074	0.010565	3190.9	3560.7	6.3030		
700	0.016643	3359.9	3776.0	6.6702	0.013654	3334.3	3743.9	6.5599	0.011523	3308.3	3711.6	6.4623		
800	0.018922	3570.7	4043.8	6.9322	0.015628	3551.2	4020.0	6.8301	0.013278	3531.6	3996.3	6.7409		
900	0.021075	3780.2	4307.1	7.1668	0.017473	3764.6	4288.8	7.0695	0.014904	3749.0	4270.6	6.9853		
1000	0.023150	3991.5	4570.2	7.3821	0.019240	3978.6	4555.8	7.2880	0.016450	3965.8	4541.5	7.2069		
1100	0.025172	4206.1	4835.4	7.5825	0.020954	4195.2	4823.9	7.4906	0.017942	4184.4	4812.4	7.4118		
1200	0.027157	4424.6	5103.5	7.7710	0.022630	4415.3	5094.2	7.6807	0.019398	4406.1	5085.0	7.6034		
1300	0.029115	4647.2	5375.1	7.9494	0.024279	4639.2	5367.6	7.8602	0.020827	4631.2	5360.2	7.7841		
<i>P</i> = 40.0 MPa					<i>P</i> = 50.0 MPa					<i>P</i> = 60.0 MPa				
375	0.001641	1677.0	1742.6	3.8290	0.001560	1638.6	1716.6	3.7642	0.001503	1609.7	1699.9	3.7149		
400	0.001911	1855.0	1931.4	4.1145	0.001731	1787.8	1874.4	4.0029	0.001633	1745.2	1843.2	3.9317		
425	0.002538	2097.5	2199.0	4.5044	0.002009	1960.3	2060.7	4.2746	0.001816	1892.9	2001.8	4.1630		
450	0.003692	2364.2	2511.8	4.9449	0.002487	2163.6	2284.7	4.5896	0.002086	2055.1	2180.2	4.4140		
500	0.005623	2681.6	2906.5	5.4744	0.003890	2528.1	2722.6	5.1762	0.002952	2393.2	2570.3	4.9356		
550	0.006985	2875.1	3154.4	5.7857	0.005118	2769.5	3025.4	5.5563	0.003955	2664.6	2901.9	5.3517		
600	0.008089	3026.8	3350.4	6.0170	0.006108	2947.1	3252.6	5.8245	0.004833	2866.8	3156.8	5.6527		
650	0.009053	3159.5	3521.6	6.2078	0.006957	3095.6	3443.5	6.0373	0.005591	3031.3	3366.8	5.8867		
700	0.009930	3282.0	3679.2	6.3740	0.007717	3228.7	3614.6	6.2179	0.006265	3175.4	3551.3	6.0814		
800	0.011521	3511.8	3972.6	6.6613	0.009073	3472.2	3925.8	6.5225	0.007456	3432.6	3880.0	6.4033		
900	0.012980	3733.3	4252.5	6.9107	0.010296	3702.4	4216.8	6.7819	0.008519	3670.9	4182.1	6.6725		
1000	0.014360	3952.9	4527.3	7.1355	0.011441	3927.4	4499.4	7.0131	0.009504	3902.0	4472.2	6.9099		
1100	0.015686	4173.7	4801.1	7.3425	0.012534	4152.2	4778.9	7.2244	0.010439	4130.9	4757.3	7.1255		
1200	0.016976	4396.9	5075.9	7.5357	0.013590	4378.6	5058.1	7.4207	0.011339	4360.5	5040.8	7.3248		
1300	0.018239	4623.3	5352.8	7.7175	0.014620	4607.5	5338.5	7.6048	0.012213	4591.8	5324.5	7.5111		

LAMPIRAN F

A. Kurva Fasa Air Menggunakan P-h Diagram

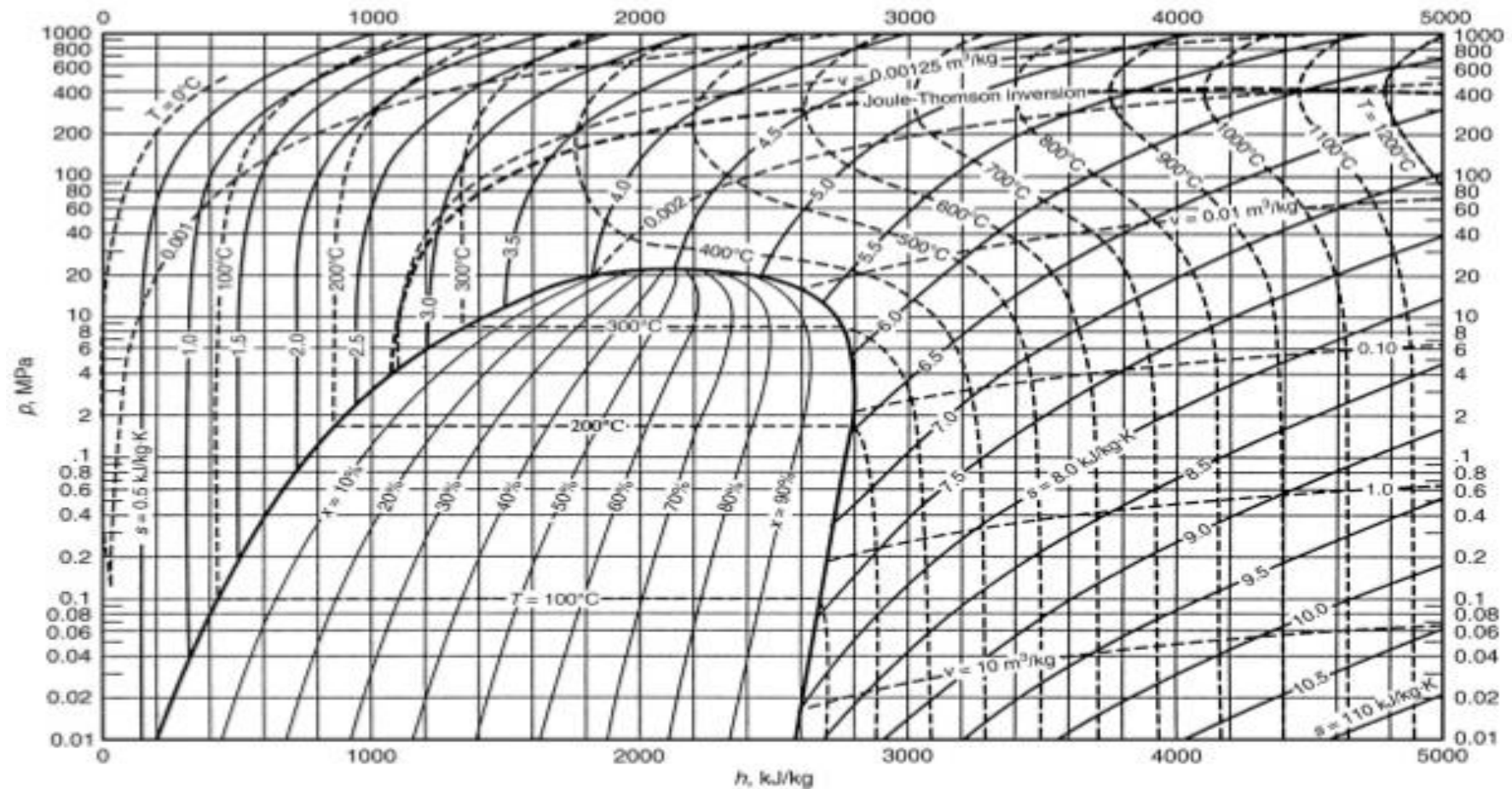
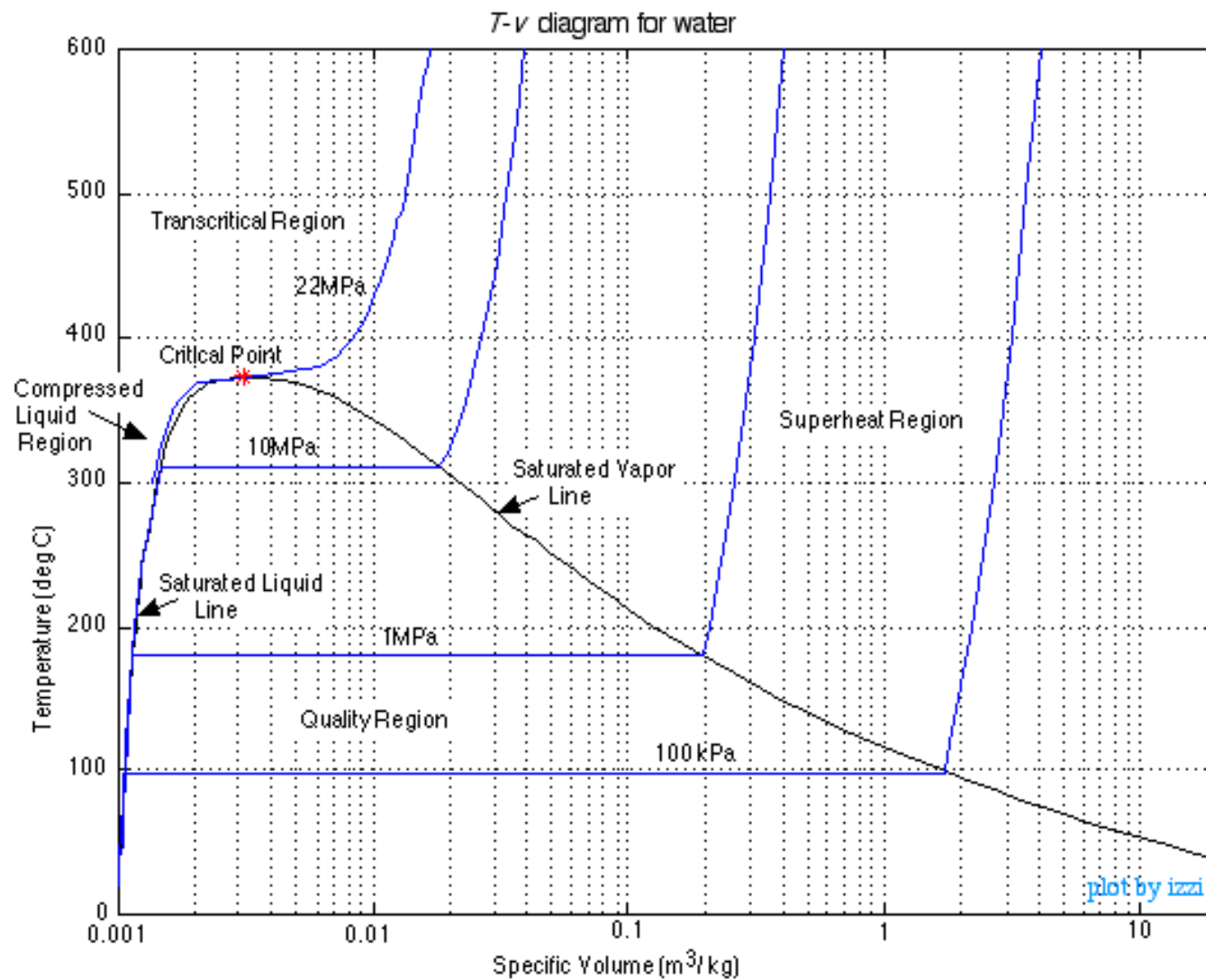


FIGURE 12.4 Pressure-enthalpy diagram for water. (Source: Jones, J.B. and Dugan, R.E. 1996. *Engineering Thermodynamics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, based on data and formulations from Haar, L., Gallagher, J.S., and Kell, G.S. 1984. *NBS/NRC Steam Tables*. Hemisphere, Washington, D.C.)

B. Kurva Fasa Air Menggunakan T-v Diagram



BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Bandung, Jawa Barat pada tanggal 16 Maret 1993. Tamat SDN II Cimahi (2005), SMPN 1 Cimahi (2008) dan SMKN 1 Cimahi (2012). Sebelum tamat SMK tepatnya pada tingkat IV, penulis sudah dapat melanjutkan studinya ke jurusan Mekatronika, Politeknik Manufaktur Negeri Bandung dan lulus pada tahun 2014. Kemudian penulis melanjutkan studi sarjana di Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan adalah Bidang Minat Rekayasa Energi. Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam beberapa organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Mekatronika pada periode 2013-2014. Pada kegiatan akademik, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium di jurusan Mekatronika Politeknik Manufaktur Negeri Bandung. Pengalaman *internship* yang dimiliki penulis dilakukan di PT. POLMAN Swadaya Bandung pada tahun 2013 dan di PT. Dirgantara Indonesia pada tahun 2016. Pada program *internship* tersebut, penulis ikut melakukan produksi alat terutama bagian programming dan elektrik di PT POLMAN Swadaya Bandung dan analisa sistem *cockpit* pada pesawat di PT Dirgantara Indonesia. Penulis dapat dihubungkan melalui alamat email witjak.adi@gmail.com.